

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE POTENCIA DE AGITACIÓN Y LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE TRES PULPAS DE FRUTA

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA QUÍMICA

JESSICA PAMELA AYALA CALDERÓN

jessica.ayala@est.epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. EDWIN RAFAEL VERA CALLE, Ph.D.

edwin.vera@epn.edu.ec

Quito, agosto 2014

© Escuela Politécnica Nacional (2014)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, JESSICA PAMELA AYALA CALDERÓN, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Jessica Pamela Ayala Calderón

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jessica Pamela Ayala Calderón, bajo mi supervisión.

Ing. Edwin Vera
DIRECTOR DE PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto PIS N°10-19, que se ejecuta en el Departamento de Ciencia en Alimentos y Biotecnología (DECAB).

AGRADECIMIENTOS

Gracias a los miembros del Departamento de Ciencias de Alimentos, en especial al Ing. Edwin Vera Ph.D. por la colaboración y orientación en el desarrollo de este proyecto.

A la empresa ENVAGRIF por la apertura brindada para que éste proyecto sea llevado a cabo.

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado con mucho cariño a mis padres, por ser mi ejemplo de perseverancia y trabajo; a mis hermanas, quienes han sido mi apoyo e inspiración; a mis compañeros, en especial a Eduardo, Lorena, Valeria y Jessica por brindarme una amistad sincera e incondicional y a todos con quienes he compartido bellos y gratos momentos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
GLOSARIO	xiii
NOMENCLATURA	xiv
RESUMEN	xv
INTRODUCCIÓN	xvi
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Tipos de fluidos	1
1.1.1 Fluidos newtonianos	1
1.1.2 Fluidos no newtonianos	2
1.1.2.1 Fluidos independientes del tiempo	3
1.1.2.2 Fluidos dependientes del tiempo	4
1.2 Agitación de fluidos	5
1.2.1 Mecanismo de mezcla o agitación	5
1.2.2 Equipo de agitación	7
1.2.2.1 Tanque de agitación	10
1.2.2.2 Agitadores	10
1.2.2.3 Placas deflectoras	12
1.3 Consumo de potencia de agitación en fluidos no newtonianos	14
1.3.1 Metodología de Metzner y Otto	17
1.3.2 Método de la pendiente	19
2. PARTE EXPERIMENTAL	21
2.1 Determinación de la viscosidad aparente para las pulpas de fruta	21
2.1.1 Caracterización fisicoquímica	21
2.1.2 Diseño experimental en la determinación de la viscosidad	21
2.1.3 Obtención de parámetros reológicos del aceite SAE20W50	22
2.1.4 Obtención de parámetros reológicos de las pulpas de mango, guayaba y tomate de árbol	23
2.2 Determinación de los números de potencia de agitación para las diferentes condiciones de operación	25
2.2.1 Diseño experimental en la determinación del número de potencia de agitación	25
2.2.2 Desarrollo parte experimental	28
2.2.3 Determinación del número de potencia	31
2.3 Obtención de la constante de proporcionalidad entre la velocidad de deformación y la velocidad de rotación	32
2.3.1 Metodología de Metzner y Otto	32

2.3.2	Metodología de la pendiente	33
2.3.3	Metodología del Gradiente de velocidad	34
2.4	Obtención de las curvas de potencia de agitación	35
2.4.1	Determinación del efecto de la pulpa de fruta agitada en el número de potencia de agitación	36
2.4.2	Determinación del efecto del tipo de agitador en el número de potencia de agitación	36
2.4.3	Determinación del efecto del uso de deflectores en el número de potencia de agitación	36
2.5	Diseño de un sistema de agitación para pulpa de fruta	37
3.	RESULTADOS	38
3.1	Caracterización físico química	38
3.2	Viscosidad aparente de las pulpas de fruta a diferentes velocidades de rotación	38
3.3	Determinación del número de potencia de agitación a diferentes condiciones	42
3.3.1	Fuerza de agitación con deflectores	42
3.3.2	Fuerza de agitación sin deflectores	46
3.3.3	Número de potencia de agitación con deflectores	49
3.3.4	Número de potencia de agitación sin deflectores	52
3.4	Curvas de potencia de agitación de SAE20W50	55
3.5	Determinación de la constante de proporcionalidad de la velocidad de deformación y la velocidad de rotación	59
3.5.1	Obtención de k_s por la metodología de Metzner y Otto	59
3.5.2	Obtención de k_s por el método de la pendiente	66
3.5.3	Relación de la velocidad de deformación por la metodología del gradiente de velocidad	69
3.6	Curvas de potencia de agitación de las pulpas de fruta de mango, guayaba y tomate de árbol	69
3.6.1	Curvas de potencia de agitación por la Metodología de Metzner y Otto	69
3.6.1.1	Efecto del tipo de fluido en el número de potencia de agitación	69
3.6.1.2	Efecto del tipo de agitador en el número de potencia de agitación	78
3.6.1.3	Efecto del uso de deflectores en el número de potencia de agitación	82
3.6.2	Curvas de potencia de agitación por la Metodología de la pendiente	82
3.6.3	Curvas de potencia de agitación por la Metodología del Gradiente de velocidad	86

3.6.3.1	Efecto del tipo de fluido en el número de potencia de agitación	86
3.6.3.2	Efecto del tipo de agitador en el número de potencia de agitación	90
3.6.3.3	Efecto del uso de deflectores en el número de potencia de agitación	95
3.7	Comparación de las curvas de potencia de agitación por las diferentes metodologías	95
3.8	Diseño de un sistema de agitación	96
3.8.1	Especificaciones del sistema de agitación en planta	96
3.8.2	Comparación de la potencia de agitación teórica con la potencia de planta	97
3.8.2.1	Potencia de agitación teórica Metzner y Otto	98
3.8.2.2	Potencia de agitación teórica Gradiente de velocidad	99
3.8.3	Variación de la Potencia de agitación con la geometría del tanque	101
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	103
4.1	Conclusiones	103
4.2	Recomendaciones	104
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
	ANEXOS	109

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Deformación de un fluido bajo un esfuerzo cortante	1
Figura 1.2.	Diagrama del comportamiento de flujo de fluidos no newtonianos	3
Figura 1.3.	Componentes de velocidad en un punto del tanque	6
Figura 1.4.	Patrones de velocidad de un agitador tipo turbina	7
Figura 1.5.	Esquema del tanque de agitación	8
Figura 1.6.	Esquema relaciones geométricas de un sistema de agitación estándar, turbina rushton	9
Figura 1.7.	Agitadores de mezcla a) hélice marina, b) turbina de palas rectas, c) turbina rushton, d) turbina de palas curvas	10
Figura 1.8.	Flujo en un tanque, a) sin placas deflectoras, b) eje descentrado, c) agitador axial con placas deflectoras, d) agitador radial con placas deflectoras	13
Figura 1.9.	Flujo en un tanque con deflectores con un agitador de turbina	13
Figura 1.10.	Flujo en un tanque con deflectores con un agitador hélice	14
Figura 1.11.	Curva de potencia de agitación de fluidos no newtonianos. A) Turbina 6 aspas planas, n° 4 deflectores. A ₁) Turbina 6 aspas planas sin deflectores. B) 2 Turbinas de 6 aspas planas separadas $D_t/2$, n° 4, $D_t/D_a=3,5$ B ₁) 2 Turbinas de 6 aspas planas separadas $D_t/D_a=1,02$, n° 4. C) Turbina 6 aspas 45° D) Hélice, eje desplazado del centro 1/3 radio agitador E) Hélice, eje centrado, n° 4 F) Hélice, doble paso G) Hélice, 4 aspas, n° 4 H) Turbina 2 Aspas planas	19
Figura 2.1.	Esquema spindle y copa del viscosímetro	24
Figura 2.2.	Dimensiones deflectores	25
Figura 2.3.	Dimensiones agitadores tipo hélice y turbina rushton	26
Figura 2.4.	Dimensiones agitadores tipo turbina de 2 aspas verticales, de 4 aspas inclinadas y verticales	27
Figura 2.5.	Esquema del sistema de agitación laboratorio	30

Figura 3.1.	Relación esfuerzo cortante en función de la velocidad de deformación, aceite SAE20W50	39
Figura 3.2.	Esfuerzo cortante (Pa) en función de la velocidad de deformación (s^{-1}), tomate de árbol	39
Figura 3.3.	Fuerza de agitación guayaba con deflectores para un agitador turbina de 4 aspas verticales	43
Figura 3.4.	Fuerza de agitación mango con deflectores para un agitador turbina de 4 aspas verticales	43
Figura 3.5.	Fuerza de agitación tomate de árbol con deflectores para un agitador turbina de 4 aspas verticales	44
Figura 3.6.	Fuerza de agitación sae20w50 con deflectores para un agitador turbina de 4 aspas verticales	44
Figura 3.7.	Fuerza de agitación guayaba sin deflectores para un agitador turbina de 4 aspas verticales	46
Figura 3.8.	Fuerza de agitación mango sin deflectores para un agitador turbina de 4 aspas verticales	47
Figura 3.9.	Fuerza de agitación tomate de árbol sin deflectores para un agitador turbina de 4 aspas verticales	47
Figura 3.10.	Fuerza de agitación sae20w50 sin deflectores para un agitador turbina de 4 aspas verticales	48
Figura 3.11.	Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), hélice con deflectores	50
Figura 3.12.	Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), rushton con deflectores	50
Figura 3.13.	Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), turbina de 2 aspas verticales con deflectores	51
Figura 3.14.	Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), turbina 4 aspas inclinadas con deflectores	51
Figura 3.15.	Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), turbina 4 aspas verticales con deflectores	52
Figura 3.16.	Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), hélice sin deflectores	53
Figura 3.17.	Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), rushton sin deflectores	53

Figura 3.18.	Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), turbina 2 aspas verticales sin deflectores	54
Figura 3.19.	Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), turbina 4 aspas inclinadas sin deflectores	54
Figura 3.20.	Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), turbina 4 aspas verticales sin deflectores	55
Figura 3.21.	Curva de potencia de agitación SAE20W50 con deflectores, agitadores de hélice, turbina rushton, turbina de 4 aspas verticales e inclinadas, turbina de 2 aspas verticales	56
Figura 3.22.	Curva de potencia de agitación SAE20W50 sin deflectores, agitadores de hélice, turbina rushton, turbina de 4 aspas verticales e inclinadas, turbina de 2 aspas verticales	57
Figura 3.23.	Curva de potencia de agitación de hélice con deflectores para SAE20W50	58
Figura 3.24.	Curva de potencia de agitación de hélice sin deflectores para SAE20W50	58
Figura 3.25.	Número de potencia en función del número de Reynolds modificado, hélice con deflectores.	67
Figura 3.26.	Curva de potencia de agitación de hélice con deflectores, Metzner y Otto	70
Figura 3.27.	Curva de potencia de agitación de rushton con deflectores, Metzner y Otto	71
Figura 3.28.	Curva de potencia de agitación de turbina 2 aspas verticales con deflectores, Metzner y Otto	71
Figura 3.29.	Curva de potencia de agitación de turbina 4 aspas inclinadas con deflectores, Metzner y Otto	72
Figura 3.30.	Curva de potencia de agitación de turbina 4 aspas verticales con deflectores, Metzner y Otto	72
Figura 3.31.	Curva de potencia de agitación de hélice sin deflectores, Metzner y Otto	74
Figura 3.32.	Curva de potencia de agitación de rushton sin deflectores, Metzner y Otto	74
Figura 3.33.	Curva de potencia de agitación de turbina 2 aspas verticales sin deflectores, Metzner y Otto	75

Figura 3.34.	Curva de potencia de agitación de turbina 4 aspas inclinadas sin deflectores, Metzner y Otto	75
Figura 3.35.	Curva de potencia de agitación de turbina 4 aspas verticales sin deflectores, Metzner y Otto	76
Figura 3.36.	Curvas de potencia de agitación turbina rushton sin deflectores en soluciones poliméricas, Tilosa y CMC carbometilcelulosa	77
Figura 3.37.	Curva de potencia de agitación guayaba con deflectores, Metzner y Otto	79
Figura 3.38.	Curva de potencia de agitación mango con deflectores, Metzner y Otto	79
Figura 3.39.	Curva de potencia de agitación tomate con deflectores, Metzner y Otto	80
Figura 3.40.	Curva de potencia de agitación guayaba sin deflectores, Metzner y Otto	80
Figura 3.41.	Curva de potencia de agitación mango sin deflectores, Metzner y Otto	81
Figura 3.42.	Curva de potencia de agitación tomate sin deflectores, Metzner y Otto	81
Figura 3.43.	Curva de potencia de agitación P_o vs Re_m , turbina 4 aspas verticales con deflectores	83
Figura 3.44.	Número de potencia de fluidos pseudoplásticos para 3 agitadores turbina de 4 aspas planas a una distancia de 0,065 m de separación, en emulsiones alimenticias E_1 y E_2 , poliacrilamida PAA, glicerina GLY y goma guar GUA	84
Figura 3.45.	Curva de potencia de agitación mango con deflectores, Pendiente	85
Figura 3.46.	Curva de potencia de agitación mango sin deflectores, Pendiente	86
Figura 3.47.	Curva de potencia de agitación de hélice con deflectores, gradiente de velocidad	87
Figura 3.48.	Curva de potencia de agitación de rushton con deflectores, gradiente de velocidad	88
Figura 3.49.	Curva de potencia de agitación de hélice sin deflectores	89
Figura 3.50.	Curva de potencia de agitación de rushton sin deflectores	90

Figura 3.51.	Curva de potencia de agitación de mango con deflectores para agitadores hélice, turbina rushton, turbina 4 aspas inclinadas, turbina 4 aspas verticales	91
Figura 3.52.	Curva de potencia de agitación de mango sin deflectores para agitadores hélice, turbina rushton, turbina 4 aspas inclinadas, turbina 4 aspas verticales y turbina 2 aspas verticales	91
Figura 3.53.	Curva de potencia de agitación de guayaba con deflectores para agitadores hélice, turbina rushton, turbina 4 aspas inclinadas, turbina 4 aspas verticales y turbina 2 aspas verticales	92
Figura 3.54.	Curva de potencia de agitación de guayaba sin deflectores para agitadores hélice, turbina rushton, turbina 4 aspas inclinadas, turbina 4 aspas verticales y turbina 2 aspas verticales	93
Figura 3.55.	Curva de potencia de agitación de tomate de árbol con deflectores para agitadores hélice, turbina rushton, turbina 4 aspas inclinadas, turbina 4 aspas verticales y turbina 2 aspas verticales	93
Figura 3.56.	Curva de potencia de agitación de tomate de árbol sin deflectores para agitadores hélice, turbina rushton, turbina 4 aspas inclinadas, turbina 4 aspas verticales y turbina 2 aspas verticales	94
Figura 3.57.	Esquema del equipo de agitación de la planta ENVAGRIF	97
Figura 3.58.	Curva de potencia de agitación, turbina 2 aspas sin deflectores. Metzner y Otto	98
Figura 3.59.	Curva de potencia de agitación, turbina 2 aspas sin deflectores, pulpa de tomate de árbol. Gradiente de velocidad	99

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1	Dimensiones estándar para un sistema de agitación	9
Tabla 1.2.	Parámetros de selección de agitadores	12
Tabla 1.3.	Valores de ks para varios tipos de agitadores	18
Tabla 2.1.	Factor de corrección de la velocidad de rotación	22
Tabla 2.2.	Dimensiones spindle small adapter	24
Tabla 3.1.	Parámetros de densidad, sólidos totales y turbidez	38
Tabla 3.2.	Resultados de la caracterización reológica de pulpas de fruta en orden ascendente y descendente	40
Tabla 3.3.	Constante de consistencia (k) e índice de comportamiento (n) de pulpa de guayaba, mango y tomate	41
Tabla 3.4.	Comparación de parámetros reológicos con °BRIX de pulpa de mango, guayaba y tomate de árbol	41
Tabla 3.5.	Viscosidad aparente de pulpa de frutas de mango, guayaba y tomate de árbol a diferentes velocidades de deformación (s-1)	42
Tabla 3.6.	Constantes de ecuación potencial para pruebas de guayaba con deflectores	45
Tabla 3.7.	Constantes de ecuación potencial para pruebas de mango con deflectores	45
Tabla 3.8.	Constantes de ecuación potencial para pruebas de tomate con deflectores	46
Tabla 3.9.	Constantes de ecuación potencial para pruebas de guayaba sin deflectores	48
Tabla 3.10.	Constantes de ecuación potencial para pruebas de mango sin deflectores	49
Tabla 3.11.	Constantes de ecuación potencial para pruebas de tomate sin deflectores	49
Tabla 3.12.	Zona lineal del aceite SAE20W50	59

Tabla 3.13.	Números de Reynolds correspondientes a los números de potencia de las pulpas de Guayaba, Mango y Tomate con deflectores	60
Tabla 3.14.	Números de Reynolds correspondientes a los números de potencia de las pulpas de Guayaba, Mango y Tomate sin deflectores	61
Tabla 3.15.	Valores de ks obtenidos por el Método de Metzner y Otto, en pruebas con deflectores	63
Tabla 3.16.	Valores de ks obtenidos por el Método de Metzner y Otto en pruebas sin deflectores	64
Tabla 3.17.	Valores de ks medios obtenidos por el Método de Metzner y Otto en guayaba, mango y tomate de árbol	65
Tabla 3.18.	Valores de Kp del SA20W50	66
Tabla 3.19.	Valores de Kp(n) de mango	68
Tabla 3.20.	Valores de ks(n) de mango por la metodología de la pendiente	68
Tabla 3.21.	Valor estadístico p, efecto del tipo de fluido para los diferentes agitadores con deflectores. Curvas Metzner y Otto	73
Tabla 3.22.	Valor estadístico p, efecto del tipo de fluido para los diferentes agitadores sin deflectores. Curvas Metzner y Otto	76
Tabla 3.23.	Valor estadístico p, efecto del tipo de agitador. Curvas Metzner y Otto	78
Tabla 3.24.	Valor estadístico p, efecto del uso de deflectores en pulpa de guayaba. Curvas Metzner y Otto	82
Tabla 3.25.	Propiedades reológicas de fluidos pseudoplásticos poliméricos	84
Tabla 3.26.	Valor estadístico p, efecto tipo de fluido pruebas con deflectores. Curvas gradiente de velocidad	87
Tabla 3.27.	Valor estadístico p, efecto del tipo de fluido pruebas sin deflectores. Curvas gradiente de velocidad	89
Tabla 3.28.	Efecto del tipo de agitador en el número de potencia de agitación, Curvas gradiente de velocidad	94
Tabla 3.29.	Especificaciones del tanque de agitación ENVAGRIF	96
Tabla 3.30.	Especificaciones del motor reductor de agitación ENVAGRIF	96

Tabla 3.31.	Potencia de agitación experimental y en planta	100
Tabla 3.32.	Relaciones geométricas del tanque de agitación experimental y en planta	100
Tabla 3.33.	Dimensiones del tanque de agitación a diferentes configuraciones	101
Tabla 3.34.	Valores de potencia, números de Reynolds y números de potencia a diferentes configuraciones	102
Tabla AII.1.	Valores de las mediciones realizadas para la obtención de los parámetros reológicos de pulpa de tomate de árbol	110
Tabla AII.2.	Valores de las mediciones realizadas para la obtención de los parámetros reológicos de pulpa de mango	111
Tabla AII.3.	Valores de las mediciones realizadas para la obtención de los parámetros reológicos de pulpa de guayaba	112
Tabla AII.4.	Valores de las mediciones realizadas para la obtención de los parámetros reológicos de aceite SAE20W50	113
Tabla AII.5.	Valores de fuerza de agitación para SAE20W50 con deflectores	114
Tabla AII.6.	Valores de fuerza de agitación para SAE20W50 sin deflectores	116
Tabla AII.7.	Valores de fuerza de agitación para guayaba	118
Tabla AII.8.	Valores de fuerza de agitación para mango	120
Tabla AII.9.	Valores de fuerza de agitación para tomate	122

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I Valores de mediciones del viscosímetro para la obtención de parámetros reológicos	110
ANEXO II Valores de medición de fuerza de agitación para la determinación de números de potencia	114
ANEXO III Ejemplo de cálculo del número de potencia de agitación	124

GLOSARIO

Esfuerzo cortante: Es la fuerza por unidad de área que se aplica un fluido paralelamente a su desplazamiento (Perry, 2006, cap.6, p.4).

Fluidos no newtonianos: Son los fluidos que no se ajustan a la ley de viscosidad de newton, ya que la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación no es lineal (Ramírez, 2006, p.33).

Índice de comportamiento reológico: Es un número adimensional de la ecuación de la ley potencia. Si n es menor a 1 el fluido es pseudoplástico, y si es mayor a 1 es dilatante (Ramírez, 2006, p.44).

Índice de consistencia: Es la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte de la ecuación de la ley de potencia (Ramírez, 2006, p.44).

Número de potencia de agitación: “Es un número adimensional que representa las fuerzas exteriores y las fuerzas de inercia aplicadas a un líquido” (Aguado, 1999, p.40)

Número de Reynolds: “Es un número adimensional que representa la relación entre las fuerzas inercia y las fuerzas de viscosidad” (Aguado, 1999, p.40).

Potencia de agitación: Es un parámetro de diseño en tanques agitados, sirve para determinar el consumo de energía en la agitación de un fluido (Aguado, 1999, p. 39).

Velocidad de deformación o de corte: Es la relación entre el cambio de velocidades y las diferentes posiciones del fluido (Perry, 2006, cap.6, p.4).

Viscosidad aparente: Es la medida de la resistencia a la deformación del fluido y varía con la velocidad de deformación (Mott, 2006, p.30).

NOMENCLATURA

μ_a	Viscosidad aparente
Fr	Número de froude
K	Índice de consistencia
k_s	Constante de proporcionalidad de la velocidad de deformación y la velocidad de rotación
N	Velocidad de rotación
P_o	Número de potencia
Re	Número de Reynolds
T	Torque
n	Índice de comportamiento reológico
γ	Velocidad de deformación
τ	Esfuerzo cortante

RESUMEN

Debido a la escasa información en la determinación de la potencia de agitación en fluidos no newtonianos, principalmente en pulpas de fruta, es importante determinar la relación entre el número de potencia de agitación y las propiedades reológicas de pulpas de fruta, en este trabajo se ha considerado las pulpas de mango, guayaba y tomate de árbol. Primero se caracterizó las pulpas de fruta y se determinó el número de potencia de agitación usando diferentes agitadores, (turbina rushton, de 2 aspas, de 4 aspas verticales, de 4 aspas inclinadas y hélice). Estas pruebas se realizaron con y sin deflectores, a diferentes velocidades de rotación en un recipiente cilíndrico de 4 L construido con dimensiones geométricas estándar.

Se determinó que las pulpas de fruta analizadas presentan un comportamiento pseudoplástico, con un índice de consistencia n menor a 1 e independencia del tiempo. Se encontró influencia de las propiedades reológicas con el número de potencia para números de Reynolds bajos, menores a 35; pero para números de Reynolds mayores a 100 no existe influencia de estas propiedades. El tipo de agitador influyó de manera significativa en el número de potencia de agitación, sin embargo el uso o no de deflectores no tuvieron un efecto significativo sobre el número de potencia de agitación dentro del rango evaluado ($Re < 1000$).

Se determinó la constante de proporcionalidad k_s de la velocidad de deformación con la velocidad de rotación. Se encontró que los valores dependen del tipo de agitador y del tipo de pulpa de fruta ensayado, siendo esta última variable de mayor influencia. Los valores de k_s encontrados están en el orden de 60, 10 y 30 para la pulpa de guayaba, mango y tomate de árbol respectivamente. Se determinó también la relación de la velocidad de deformación con la velocidad de rotación en función de las dimensiones del agitador y del recipiente de agitación y se propuso una correlación en función de estas dimensiones.

Finalmente se comparó la potencia de agitación teórica con la potencia de agitación instalada en una planta procesadora de pulpas de fruta y se determinó que la potencia de agitación teórica representa aproximadamente la mitad de la potencia de agitación instalada.

INTRODUCCIÓN

La agitación es una operación unitaria aplicada en la industria de procesos para la suspensión de sólidos, el mezclado de líquidos miscibles, la dispersión de un gas en un líquido o para el mejoramiento de la transferencia de calor o de masa (Perry, 2006, cap. 6, p. 34). En la elaboración de pulpas o derivados de fruta se emplea para mantener la homogeneidad del producto.

El consumo de potencia es un parámetro a considerar en el diseño de sistemas de agitación por razones de economía. La determinación de la potencia de agitación se realiza mediante gráficos donde se relaciona el número de potencia con el número de Reynolds para diferentes tipos de agitadores y relaciones geométricas, curvas que están disponibles en bibliografía para fluidos newtonianos (Chhabra y Richardson, 2008, p. 385).

Los fluidos de pulpa de fruta presentan un comportamiento no newtoniano pseudoplástico en la mayoría de casos, razón por la cual es necesario un estudio de consumo de potencia en este grupo de fluidos. Se han realizado estudios previos para determinar el efecto de las propiedades reológicas en la potencia de agitación con el uso de diferentes configuraciones geométricas, sin embargo estas pruebas se han realizado generalmente con sustancias poliméricas (Cavadas y Pinho, 2001; Shekhar y Jayanti, 2003, p.33) y existe poca información para pulpas de fruta.

Este proyecto tiene por objeto determinar la relación entre el número de potencia de agitación y las propiedades reológicas de pulpas de fruta de mango, guayaba y tomate de árbol; empleando diferentes agitadores. Asimismo de estudiar el efecto sobre el número de potencia de agitación con el uso o no de deflectores. Además de determinar la constante de proporcionalidad entre la velocidad de deformación y la velocidad de rotación por diferentes metodologías. Finalmente a partir de estos resultados se presenta el diseño un sistema de agitación para pulpa de fruta.

Esta investigación servirá para empresas procesadoras de productos y derivados de pulpa de fruta, diseñadores de planta, docentes y estudiantes para efectos de diseño, dimensionamiento y consideraciones económicas.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 TIPOS DE FLUIDOS

Los fluidos se clasifican según su respuesta frente a la acción de una fuerza externa de cizalla. Se representa esta acción en la Figura 1.1, un fluido incompresible está limitado por dos placas paralelas a una distancia H , la placa inferior es fija, mientras que la superior es móvil; si se somete el fluido a un corte de cizalla por efecto de una fuerza F , ésta será balanceada por una fuerza de fricción interna del fluido igual y opuesta (Chhabra y Richardson, 2008, p. 1).

En el interior del fluido se establecerá un perfil de velocidad lineal, el fluido cercano a la capa inferior tiene una velocidad de cero y el fluido junto a la placa superior tiene una velocidad V , (Perry, 2006, cap.6, p. 4).

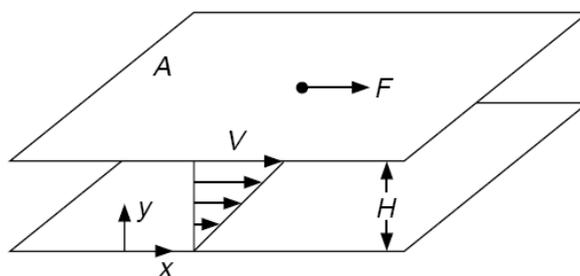


Figura 1.1. Deformación de un fluido bajo un esfuerzo cortante
(Perry, 2006, p. 4)

1.1.1 FLUIDOS NEWTONIANOS

Los fluidos newtonianos siguen la ley de Newton, la cual determina una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte, según la ecuación 1.1. Se denomina esfuerzo cortante τ , a la fuerza por unidad de área que se aplica paralelamente al desplazamiento de un fluido. Es una magnitud microscópica ya que cambia en cada punto del perfil de velocidades. La velocidad de corte γ , se denomina al cambio de velocidades entre las diferentes posiciones del fluido.

$$\frac{F}{A} = \tau_{yx} = \mu \left(-\frac{dV_x}{dy} \right) = \mu \gamma_{yx} \quad [1.1]$$

Dónde:

μ : Viscosidad (Pa.s)

τ : Esfuerzo cortante (Pa)

γ : Velocidad de deformación (s^{-1})

La viscosidad de un fluido μ es el indicador de la facilidad con la que este fluye ante la aplicación de un esfuerzo cortante. Se define como la relación del esfuerzo cortante y la velocidad de corte. (Mott, 2006, pp. 27,28).

En fluidos newtonianos la viscosidad es constante y depende únicamente de la temperatura y del material del fluido; como ejemplos están el agua, aceite, gasolina, alcohol, keroseno, benceno, glicerina. (Mott, 2006, p. 30).

1.1.2 FLUIDOS NO NEWTONIANOS

En fluidos no newtonianos la viscosidad no es constante ya que la relación de esfuerzo cortante y la velocidad de deformación no es lineal, esta depende de la velocidad de deformación y en otros casos del tiempo (Ramírez, 2006, p. 33).

La relación del esfuerzo cortante con la velocidad de deformación para los fluidos newtonianos y no newtonianos se representa en el diagrama de la Figura 1.2.

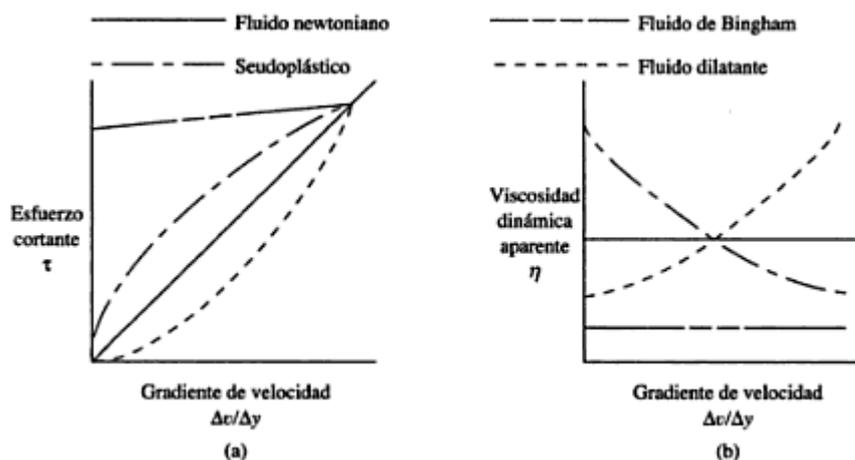


Figura 1.2. Diagrama del comportamiento de flujo de fluidos no newtonianos
(Mott, 2006, p. 30)

1.1.2.1 Fluidos independientes del tiempo

Fluidos en los cuales su viscosidad no varía con el tiempo, a cualquier esfuerzo cortante dado.

Pseudoplásticos

En estos fluidos la viscosidad aparente decrece con el incremento de la velocidad de corte, como ejemplos están: plasma sanguíneo, polietileno fundido, látex, almíbares, melazas, pulpas de fruta. Estos fluidos obedecen a la ley de la potencia que se expresa en la ecuación 1.2.

$$\tau = K\gamma^n \quad [1.2]$$

La viscosidad aparente se expresa, en función de la velocidad de deformación según la ecuación 1.3

$$\mu_a = K\gamma^{n-1} \quad [1.3]$$

Dónde:

n : Índice de comportamiento reológico <1

K : Índice de consistencia o coeficiente de Ley de potencia ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)

μ_a : Viscosidad aparente ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

Dilatantes

En estos fluidos la viscosidad aparente se incrementa con el incremento de la velocidad de corte, en esta clasificación están las suspensiones de partículas a cierta concentración: almidón de maíz en etilenglicol, almidón en agua (Chhabra y Richardson, 2008, pp. 14,15).

Viscoplásticos

Estos fluidos se comportan como sólidos hasta que superen un esfuerzo inicial, luego pueden comportarse como un fluido newtoniano se los conoce también como fluidos de Bingham o como un fluido que obedece la ley de potencia. La pasta dental, salsa de tomate, chocolate fundido, dulce de leche son algunos ejemplos (Mott, 2006, p.31; Chhabra y Richardson, 2008, p.12).

1.1.2.2 Fluidos dependientes del tiempo

Estos fluidos dependen del tiempo que se aplique la velocidad de deformación, debido a que la estructura del fluido presenta cambios de reorientación y ruptura durante la deformación. Estos cambios ocurren simultáneamente siendo uno de ellos predominante. En este grupo se encuentran los fluidos tixotrópicos, reopéticos y viscoelásticos.

Los fluidos tixotrópicos muestran una disminución del esfuerzo cortante con el tiempo a una velocidad de corte constante, prevalece la ruptura de la estructura.

En este grupo se encuentran la mayonesa, suspensiones de arcilla y algunas pinturas (Ramírez, 2006, p.38)

Los fluidos reopécticos se comportan de forma opuesta a los tixotrópicos, el esfuerzo cortante se incrementa con el tiempo a una velocidad de corte constante debido a que ocurre un mayor reordenamiento o regeneración de la estructura del fluido; un ejemplo son las suspensiones de yeso (Hermida, 2000, pp. 211-214, Perry, 2006, cap.6, p. 5).

Los fluidos viscoelásticos son aquellos que tienen propiedades de fluidos ideales (newtonianos) y sólidos elásticos, además muestran una recuperación parcial elástica después de una deformación (Chhabra y Richardson, 2008, p. 12).

1.2 AGITACIÓN DE FLUIDOS

La agitación de fluidos es una operación unitaria importante en la industria de procesos químicos, farmacéuticos, poliméricos, alimenticios entre otros. Se la utiliza para la homogenización de un producto, mejorar la transferencia de calor, y la transferencia de masa, acelerar reacciones y lograr el contacto entre diferentes fases (Perry, 2006, cap. 6, p. 34).

1.2.1 MECANISMO DE MEZCLA O AGITACIÓN

El movimiento del fluido se provoca por un impulsor revolucionado, las propiedades del fluido, como la viscosidad, densidad influyen directamente en el régimen del flujo, el cual puede ser laminar, turbulento, transitorio o todos a la vez en diferentes partes del recipiente de agitación.

La velocidad en un punto del tanque tiene tres componentes; radial o perpendicular al eje del agitador; longitudinal o paralela al eje del agitador; rotacional, tangencial o tangente a la trayectoria de rotación del rodete, como se visualiza en la Figura 1.3. El tipo de flujo dependerá de las variaciones de estas tres componentes de un punto a otro. El fluido sale del impulsor en dirección

radial, luego se divide en dirección longitudinal hacia arriba y hacia abajo, luego retorna al eje y retorna al agitador.

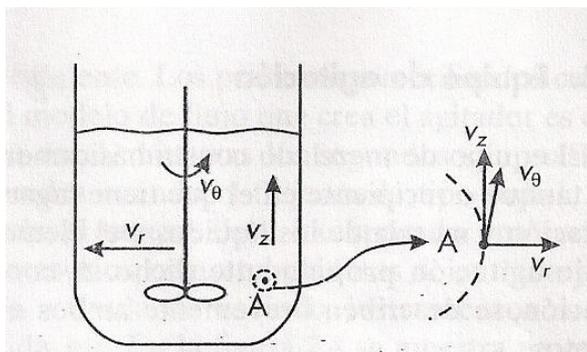


Figura 1.3. Componentes de velocidad en un punto del tanque
(Aguado, 1999, p. 33)

En el flujo laminar, prevalece la componente tangencial, que produce una división del fluido en pequeñas y delgadas unidades concéntricas alrededor del eje. Se obtiene un mezclado por difusión molecular.

En flujo turbulento se obtiene un mezclado por difusión remolino o turbulenta; se da en fluidos de baja viscosidad $\mu < 10 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ (Aguado, 1999, pp. 32,34).

La velocidad de corriente que sale del agitador debe ser suficiente para que se dé la circulación en todo el tanque. La velocidad es más alta en el extremo del agitador y disminuye a lo largo de la distancia radial, la mínima velocidad está en la parte superior e inferior del agitador. En la Figura 1.4 se ilustra las fracciones de velocidad de la punta del agitador en los diferentes puntos del recipiente de agitación. En la zona cercana al agitador los gradientes de velocidad son más altos (Derksen y Van den Akker, 1999, pp. 217 y 218; Wilkens *et al.*, 2003, p.45).

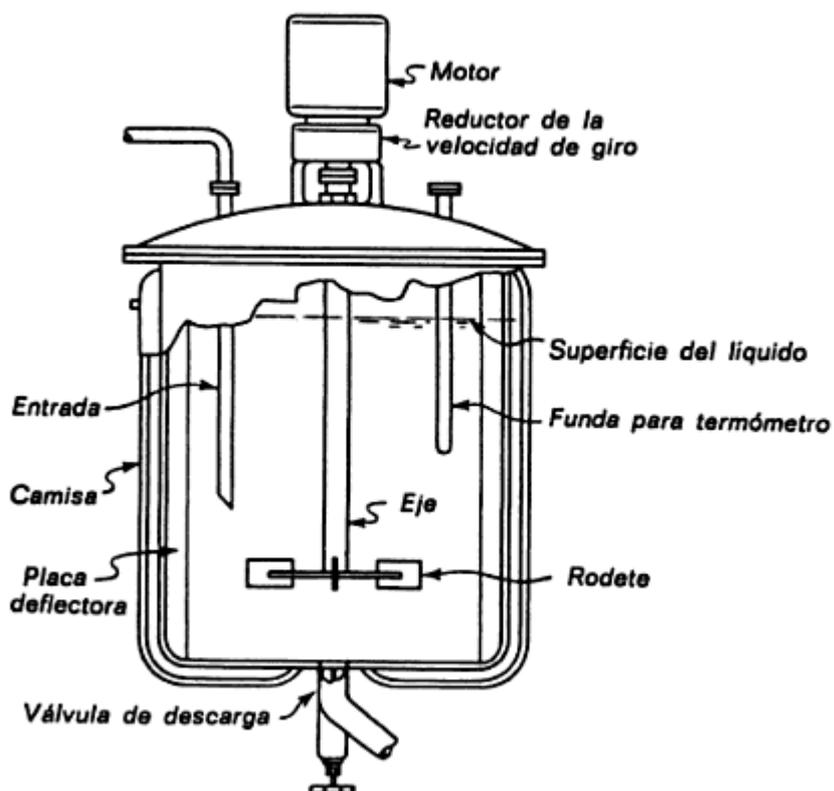


Figura 1.5. Esquema del tanque de agitación
(McCabe y Smith, 2002, p. 252)

Las proporciones del tanque varían ampliamente en el intervalo que se detalla en la Tabla 1.1, generalmente se emplean los valores estándar de un sistema de agitación con una turbina rushton, que se muestra en la Figura 1.6 (McCabe y Smith, 2002). Para otros agitadores, las relaciones geométricas del diámetro son diferentes y se establecen de acuerdo al tipo de agitador; pero otras relaciones geométricas como la posición del agitador, el nivel del líquido y la dimensión de los deflectores son semejantes.

Tabla 1.1. Dimensiones estándar para un sistema de agitación

Razón geométrica	Intervalo de valores	Valor Estándar Turbina Rushton	Paletas	Turbina de aspas verticales o inclinadas
$\frac{H}{D_t}$	1-3	1	1	1
$\frac{D_a}{D_t}$	$\frac{1}{4} - \frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{6}{10} - \frac{8}{10}$	$\frac{3}{10} - \frac{5}{10}$
$\frac{E}{D_t}$	$\frac{1}{4} - \frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
$\frac{J}{D_t}$	$\frac{1}{12} - \frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$
$\frac{W}{D_t}$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{10}$		$\frac{1}{10}$
$\frac{L}{D_a}$				$\frac{1}{4}$

(Aguado, 1999, p. 38; Couper, 2005, p. 277; Geankoplis, 2002, pp. 161-163)

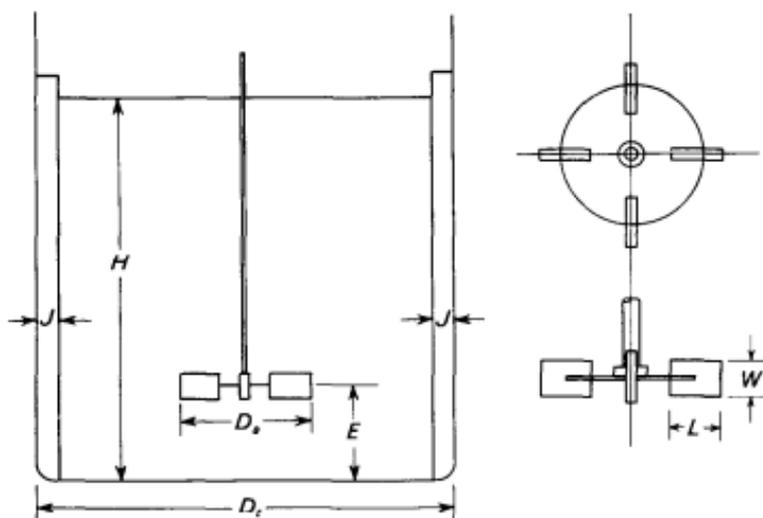


Figura 1.6. Esquema relaciones geométricas de un sistema de agitación estándar, turbina rushton

(McCabe y Smith, 2002, p. 252)

1.2.2.1 Tanque de agitación

El recipiente de agitación generalmente es cilíndrico, con una base redondeada y no plana para evitar zonas muertas en las que no penetraría corrientes de fluido. La altura del líquido en la mayoría de casos es igual al diámetro del tanque, en el caso que el recipiente sea más alto se instala un agitador por cada diámetro. (Aguado, 1999, p. 34).

1.2.2.2 Agitadores

Los agitadores se clasifican según su velocidad de giro, los muy revolucionados tipo turbina y hélice y los poco revolucionados tipo helicoidal. La utilización del agitador depende de la viscosidad del fluido. Ejemplos de agitadores se ilustran en la Figura 1.7.

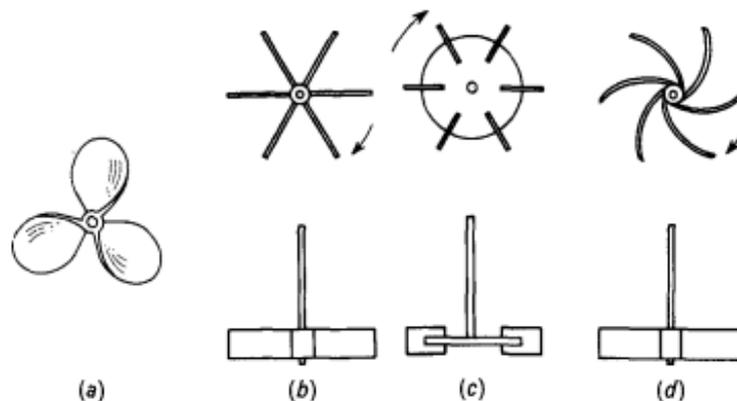


Figura 1.7. Agitadores de mezcla a) hélice marina, b) turbina de palas rectas, c) turbina rushton, d) turbina de palas curvas
 (McCabe, 1988, p.255)

Hélice

Los agitadores de hélice forman un flujo axial, se emplean en fluidos de baja viscosidad, evitan zonas muertas, sin placas deflectoras forman un flujo circulatorio es decir vórtices, los cuales reducen el grado de homogeneidad del fluido. Las hélices pequeñas giran a 1 150 o 1 750 rpm, y las hélices grandes giran

de 400 a 800 rpm. (Chhabra y Richardson, 2008, p. 402; McCabe y Smith, p. 261).

Turbina

Las turbinas tienen una amplia gama de geometrías, producen un flujo radial y tangencial, se crea circulación en la zona superior e inferior del tanque. Turbinas de aspas planas producen una mayor velocidad tangencial que no favorece una buena mezcla. En régimen laminar prevalece el flujo radial y las velocidades del líquido lejos del agitador se debilitan y se reduce el grado de mezclado. (Aguado, 1999, p. 36).

Pala o Paletas

Los agitadores de palas son aspas sencillas rectas o inclinadas, pueden ser de 2 a 4 palas. La velocidad de giro está comprendida de 20 a 200 rpm, longitud representa un 50 a 75% del diámetro del recipiente, el ancho 1/6 - 1/10 de su longitud. Se emplean en operaciones de mezcla sencillas, líquidos miscibles o la preparación de disoluciones de productos sólidos (Aguado, 1999, p. 36).

Ancla o helicoidales

Los agitadores de ancla se emplean en la agitación de fluidos viscosos de 50 a 1000 Pa.s, la velocidad de giro comprende 50 a 500 rpm. Los de ancla tienen brazos que se adaptan a la forma del recipiente para evitar la acumulación de partículas sólidas, Promueve buena transferencia de calor hacia o desde la pared del tanque pero no presenta movimiento vertical.

Los helicoidales son un especie de tornillo helicoidal, facilita el movimiento por todo el recipiente, se emplea en fluidos de alta viscosidad $\mu > 1000$ Pa.s, como masa de pan, pastas etc.

En la Tabla 1.2 se resumen los parámetros de selección de agitadores, de acuerdo a su uso, velocidad de operación, viscosidad y patrón de flujo.

Tabla 1.2. Parámetros de selección de agitadores

Tipo de agitador	Rango de velocidad de rotación RPM	Viscosidad (Pa.sⁿ)	Patrón de flujo	Usos
Hélice de 3 aspas	400-1750	< 3	axial	Líquidos de baja viscosidad
Paletas	20-200	50-500	radial	Pastas de almidón, pinturas,
Ancla o compuerta	50-500	50-1000	radial	
Turbina de aspas planas	30-500	< 100		Dispersión líquido/líquido
Turbina de aspas inclinadas o curvas	30-500			
Helicoidal		500 - 1000		Líquidos viscosos

(Aguado, 1999, pp.35-38; Geankoplis, 2002, pp. 161-165)

1.2.2.3 Placas deflectoras

La agitación de fluidos a altas velocidades promueve la formación de vórtices que no favorecen un buen mezclado. Los vórtices se pueden evitar con una posición descentrada del eje o con la colocación de placas deflectoras (Cudak y Karcz, 2006, pp. 375, 377, 378). En la Figura 1.8 se ilustra la agitación sin deflectores con la posición centrada del eje, se observa que el movimiento se da en un solo sentido y que se forma un vórtice; pero si se descentra el eje el movimiento tiene otros sentidos y el vórtice se reduce; con la colocación de deflectores se cambia el movimiento en varios sentidos y se elimina el vórtice.

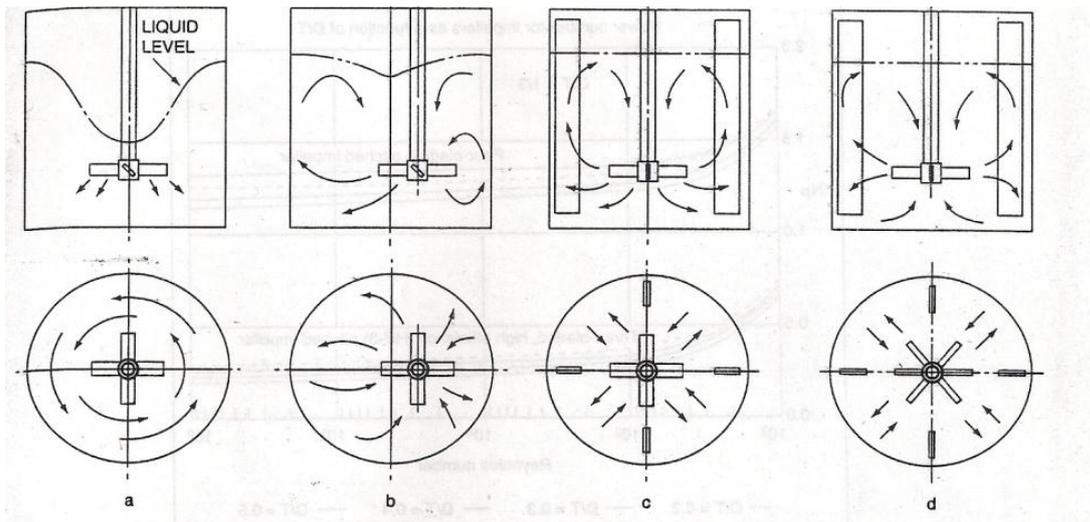


Figura 1.8. Flujo en un tanque, a) sin placas deflectoras, b) eje descentrado, c) agitador axial con placas deflectoras, d) agitador radial con placas deflectoras
(Couper, 2005, p. 281)

La posición de deflectores cambia la orientación del flujo del fluido. El flujo en un tanque con un agitador de turbina es radial. El flujo en un tanque con un agitador de hélice es axial; los dos casos de muestran en la Figura 1.9 y Figura 1.10 (Chhabra y Richardson, 2008, p. 402).

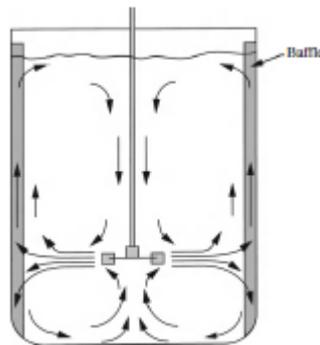


Figura 1.9. Flujo en un tanque con deflectores con un agitador de turbina
(Doran, 2013, p. 263)

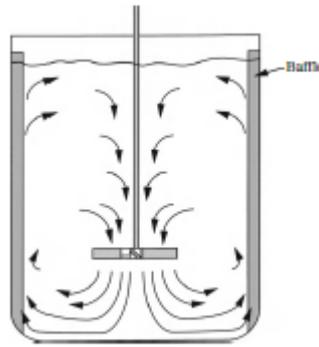


Figura 1.10. Flujo en un tanque con deflectores con un agitador hélice
(Doran, 2013, p. 263)

1.3 CONSUMO DE POTENCIA DE AGITACIÓN EN FLUIDOS NO NEWTONIANOS

La potencia de agitación es un parámetro de diseño en tanques agitados, sirve para determinar el consumo de energía en la agitación de un fluido. La potencia de agitación depende de variables dependientes del diseño del equipo como tipo del agitador y geometría del sistema; variables dependientes del fluido, densidad y viscosidad y variables de operación, velocidad de rotación del agitador (Aguado, 1999, p. 39). Esta potencia se expresa en función de las variables en la ecuación 1.4.

$$P = f(\mu, \rho, D_a, D_t, N, g, \text{dimensiones geométricas}) \quad [1.4]$$

Dónde:

P: potencia (w)

N: velocidad de rotación (rps)

D_a : diámetro del agitador

D_t : diámetro del tanque

μ : viscosidad (Pa.s)

g: gravedad (m/s^2)

Con el fin de representar la potencia para un equipo de diferente dimensión, esta se expresa en función de las variables del sistema mediante correlaciones empíricas, según la ecuación 1.5. El número de potencia es función del número de Reynolds, el número de Froude y de las relaciones geométricas.

$$\frac{P}{N^3 \rho D_a^5} = f\left(\frac{ND_a^2 \rho}{\mu}, \frac{N^2 D_a}{g}, \text{relaciones geométricas}\right) \quad [1.5]$$

$$P_o = f(Re, Fr, \text{relaciones geométricas}) \quad [1.6]$$

Dónde:

P_o : Número de potencia de agitación

Re : Número de Reynolds

Fr : Número de Froude

El número de potencia P_o representa el cociente entre las fuerzas exteriores y las fuerzas de inercia aplicadas al fluido. El número de Reynolds Re representa la relación de las fuerzas de inercia y las fuerzas de viscosidad. El número de Froude Fr representa la relación entre las fuerzas de inercia y la fuerza gravitacional.

El número de potencia de agitación se grafica en función del número de Reynolds en escala logarítmica, esta gráfica se conoce como curva de potencia de agitación, la ecuación 1.7 describe la tendencia de estas curvas.

$$P_o = A Re^x Fr^y \quad [1.7]$$

Donde:

A : constante característica de cada agitador

x : constante de Reynolds

y : constante de Froude

Las constantes x , y dependen del régimen de agitación del fluido.

En el régimen laminar, la constante x es igual a -1, el número de Froude no es influyente y la constante y es igual a 0, por lo que el número de potencia de agitación se expresa por la ecuación $P_o = ARe^x$.

En el régimen transitorio las fuerzas inerciales y gravitacionales se vuelven significativas, la constante y depende del número de Reynolds, como también de la geometría del sistema.

En el régimen turbulento las fuerzas viscosas se vuelven despreciables y las fuerzas gravitacionales son significativas, por lo que el número de potencia de agitación se describe por la ecuación $P_o = A$ (Aguado, 1999, pp. 40,41).

El número de Reynolds depende de la viscosidad del fluido, en el caso de fluidos no newtonianos, la viscosidad aparente cambia en cada velocidad de rotación. La viscosidad aparente sigue el modelo de la ley de potencia, en la que es proporcional potencialmente a la velocidad de deformación. En número de Reynolds en fluidos no newtonianos se expresa en la ecuación 1.8.

$$Re = \frac{ND_a^2\rho}{\mu_a} \quad [1.8]$$

Dónde:

μ_a : Viscosidad aparente

Otra alternativa de expresar el número de Reynolds en fluidos no newtonianos, es mediante la ecuación 1.9, en la que se considera los parámetros reológicos pero no el tipo de agitador y ni el flujo que este produce (Cavadas y Pinho, 2001).

$$Re_m = \frac{\rho N^{2-n} D_a^2}{K} \quad [1.9]$$

Dónde:

Re_m : Número de Reynolds modificado

K : Índice de consistencia (Pa.sⁿ)

D_a : Diámetro del agitador (m)
 N : Velocidad de rotación (rps)
 n : Índice de comportamiento reológico

1.3.1 METODOLOGÍA DE METZNER Y OTTO

Metzner y Otto establecieron que la velocidad de deformación es directamente proporcional a la velocidad de rotación, relación que se muestra en la ecuación 1.10. Además determinaron que la constante de proporcionalidad k_s es independiente del índice del comportamiento reológico y únicamente depende de la configuración del sistema de agitación.

$$\gamma = k_s N \quad [1.10]$$

Dónde:

k_s : Constante de proporcionalidad
 N : Velocidad de rotación

Para estipularlo, comprobaron que los números de potencia de dos fluidos diferentes agitados a una misma velocidad de rotación eran similares, siempre y cuando la agitación se dé dentro del régimen laminar (Metzner y Otto, 1957, pp. 4 y 5; Sánchez *et al.*, 2006, pp. 3y 4).

Por lo tanto el método a seguir para obtener la viscosidad aparente en fluidos no newtonianos es tomar como referencia las curvas de potencia de un fluido newtoniano. De esta curva se obtiene el número de Reynolds correspondiente al número de potencia del fluido no newtoniano. Se calcula la viscosidad a partir del número de Reynolds y mediante el modelo de la ley de potencia se determina la constante de proporcionalidad k_s . Este procedimiento se repite para las velocidades de rotación que están en el régimen laminar y el valor de k_s se promedia. (Knoch, 1999, p.113; Chhabra y Richardson; 2008; pp. 391,392).

Los valores de k_s obtenidos por este método para agitadores de turbina y hélice se muestran en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Valores de k_s para varios tipos de agitadores

Agitador	Deflectores	D_a (m)	D_t/D_a	N(Hz)	$k_s(n<1)$
Turbina de 6 aspas planas	4, $J/D_t=0,1$	0,051-0,20	1,3-5,5	0,05-1,5	$11,5 \pm 1,5$
Turbina de 6 aspas planas	Ninguno	0,051-0,20	1,3-5,5	0,18-0,54	$11,5 \pm 1,4$
2 Turbinas de 6 aspas planas separadas $D_T/2$	4, $J/D_t=0,1$		3,5	0,14-0,72	$11,5 \pm 1,4$
2 Turbinas de 6 aspas planas separadas $D_T/2$	4, $J/D_t=0,1$ o Ninguno		1,02-1,18	0,14-0,72	$11,5 \pm 1,4$
Turbina de 6 aspas curvas a 45°	4, $J/D_t=0,1$, o ninguno	0,10-0,20	1,33-3,0	0,21-0,26	13 ± 2
Turbina de 6 aspas curvas a 45°	4, $J/D_t=0,1$, o ninguno	0,10-0,30	1,33-3,0	1,0-1,42	13 ± 2
Hélice	Ninguno, eje desplazado 10° eje	0,13	2,2-4,8	0,16-0,40	$10 \pm 0,9$
Turbina de 2 aspas planas	4		2-3	0,66-1,68	10

(Chhabra y Richardson, 2008, p. 393)

Curvas de potencia de agitación de fluidos no newtonianos se representan en la Figura 1.11, cuyos Reynolds se determinaron por el Método de Metzner y Otto.

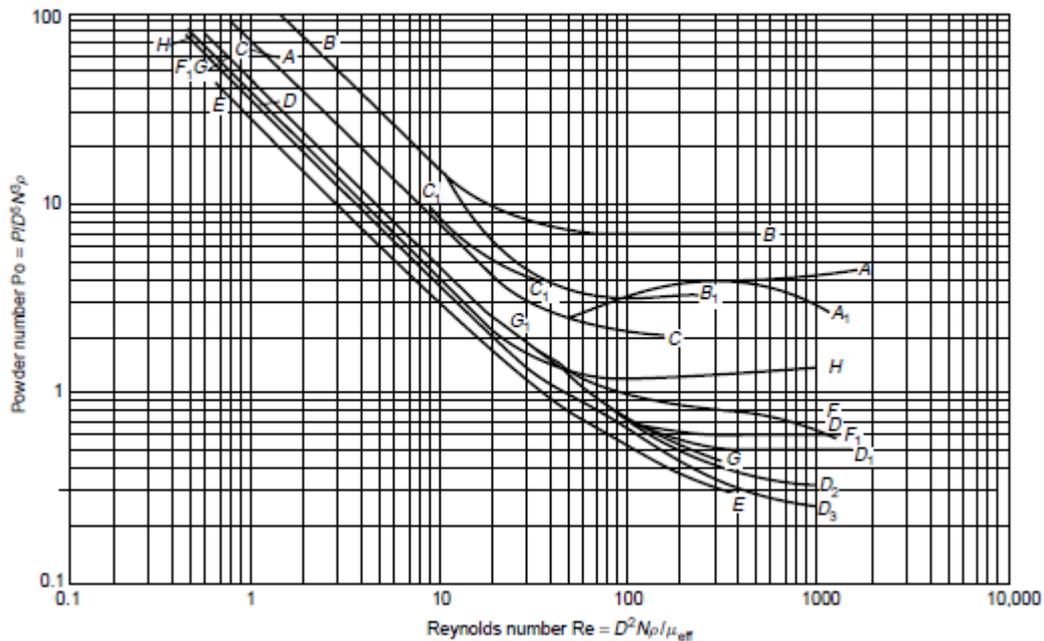


Figura 1.11. Curva de potencia de agitación de fluidos no newtonianos. A) Turbina 6 aspas planas, n° 4 deflectores. A₁) Turbina 6 aspas planas sin deflectores. B) 2 Turbinas de 6 aspas planas separadas $D_t/2$, n° 4, $D_t/D_a=3,5$ B₁) 2 Turbinas de 6 aspas planas separadas $D_t/D_a=1,02$, n° 4. C) Turbina 6 aspas 45° D) Hélice, eje desplazado del centro 1/3 radio agitador E) Hélice, eje centrado, n° 4 F) Hélice, doble paso G) Hélice, 4 aspas, n° 4 H) Turbina 2 Aspas planas
(Chhabra y Richardson, 2008, p. 394)

1.3.2 MÉTODO DE LA PENDIENTE

En fluidos newtonianos el producto del número de potencia y el número de Reynolds es constante en el régimen laminar, dicha constante se denomina por K_p , la cual depende de la configuración geométrica del tanque-agitador y se muestra en la ecuación 1.11.

$$K_p = P_o * Re \quad [1.11]$$

Para una turbina rushton estándar el valor de la constante K_p es de 75, para agitadores tipo ancla este valor está entre 200 y 300, en agitadores tipo hélice este valor está entre 35 y 50, en agitadores tipo tornillo este valor está entre 200 y 400 (Chhabra y Richardson, 2008, p.385; Foucault *et al.*, 2004, p.327).

Rieger and Novak sugirieron este método, en el cual el producto del número de potencia y del número de Reynolds modificado es constante en la zona lineal, esta constante se denota por Kp_n y se muestra en la ecuación 1.12 (Thakur, 2004, p.1216; Foucault *et al.*, 2004, pp. 326 y 327).

$$Kp_n = Po * Re_m \quad [1.12]$$

El número de Reynolds modificado Re_m se calcula con la ecuación 1.9 presentada en el subcapítulo 1.3.1

Los valores de Kp y $Kp(n)$ se pueden expresar en función del torque T , y se representan en las ecuaciones 1.13 y 1.14

$$Kp = \frac{2\pi T}{\mu * ND_a^3} \quad [1.13]$$

$$Kp_n = \frac{2\pi T}{K * N^n D_a^3} \quad [1.14]$$

Se relacionan estas constantes y se considera que las medidas de torque son iguales y sus viscosidades equivalentes. Se emplean las ecuaciones 1.3 y 1.10 de la viscosidad aparente y la relación de la velocidad de deformación respectivamente.

$$\frac{Kp_n}{Kp} = \frac{\mu_a * N}{K * N^n} = \frac{K * (ksN)^{n-1} * N}{K * N^n} \quad [1.15]$$

La ecuación 1.16, describe la obtención de k_s que depende del índice de comportamiento reológico.

$$k_{s(n)} = \left(\frac{Kp_n}{Kp} \right)^{1/(n-1)} \quad [1.16]$$

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD APARENTE PARA LAS PULPAS DE FRUTA

2.1.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA

Se emplearon pulpas de fruta de mango, tomate de árbol y guayaba de la marca María Morena. Las pulpas de fruta María Morena siguen un proceso de lavado, pelado, escaldado, despulpado, homogenizado, pasteurizado, empaquetado y se conservan congeladas.

Con el fin de analizar el comportamiento reológico de las pulpas de fruta fue necesario realizar la caracterización físicoquímica. Los ensayos para determinar los parámetros físicoquímicos se realizaron con muestras de pulpas de fruta termostalizadas a 20°C.

La densidad se determinó por el método volumétrico en un matraz de 250 ml, se empleó una balanza de marca SARTORIUS, modelo 1204MP ($\pm 0,01$ g). La turbidez se determinó con un turbidímetro de marca HACH, modelo 2100Q ($\pm 0,2\%$), fue necesario realizar diluciones de 1 a 200. Los sólidos solubles se determinaron con un refractómetro portable de marca EPIC, modelo EA15, escala de 0-30°BRX. Los sólidos totales se obtuvieron por el método gravimétrico AOAC 929.15137.1.12 (2005).

2.1.2 DISEÑO EXPERIMENTAL EN LA DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD

Antes de cada medida las muestras de pulpas de fruta puras de guayaba, mango y tomate de árbol, además del aceite SAE20W50 se termostataron a 20 °C.

Para la caracterización reológica se realizaron medidas de torque, viscosidad y esfuerzo cortante en el viscosímetro digital Brookfield RV TDV-II.

Se realizaron las medidas para cada pulpa de fruta a 5, 10, 20, 50 y 100 rpm en orden ascendente. Se mantuvo a 100 rpm durante 5 mín. y se volvió a tomar los datos en orden descendente; con el fin de determinar la dependencia de la viscosidad con el tiempo (Andrade *et al.*, 2009, pp. 14 y 15). Se realizaron tres réplicas para cada muestra.

Los datos de esfuerzo cortante a cada velocidad de rotación se ajustaron a la ley de potencia para determinar el índice de consistencia y el índice de comportamiento reológico, la metodología numérica se presenta en el ítem 2.2.1.1 y 2.2.1.2.

2.1.3 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS DEL ACEITE SAE20W50

Se empleó al aceite SAE20W50 como referencia de fluido newtoniano según ensayos bibliográficos (Tanveer *et al.*, 2006, p.184)

Para la obtención de los parámetros reológicos del aceite SAE20W50, se graficó los datos de esfuerzo cortante en función de la velocidad de corte. La velocidad de corte se determinó a partir de la ecuación 2.1, con los factores del viscosímetro, aplicables en espacio estrecho $S/R_b \leq 0,1$.

$$\gamma = RPM * SRC \quad [2.1]$$

RPM: velocidad de rotación del spindle en RPM

SRC: factor de corrección de la velocidad de rotación

El factor correspondiente al spindle empleado se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Factor de corrección de la velocidad de rotación

N° spindle	SRC
21	0,93

(Brookfield DVII+ Manual, p. 50)

2.1.4 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS DE LAS PULPAS DE MANGO, GUAYABA Y TOMATE DE ÁRBOL

Los parámetros reológicos se obtuvieron a partir de la curva del esfuerzo cortante (Pa) en función de la velocidad de deformación (s^{-1}). La velocidad de deformación en cilindros de espacio ancho ($S/R_b > 0,1$) se calculó con el factor de corrección correspondiente a la pendiente de la curva $\ln\omega$ vs $\ln\tau$, señalada en la ecuación 2.2 (Chhabra y Richardson, 2008, p. 42).

$$\gamma = 2 * \omega * \frac{d(\ln\omega)}{d(\ln\tau)} \quad [2.2]$$

Dónde:

γ : Velocidad de deformación (s^{-1})

ω : Velocidad angular (rad/s)

τ : Esfuerzo cortante (Pa)

$\frac{d(\ln\omega)}{d(\ln\tau)}$: Pendiente de la curva $\ln\omega$ vs. $\ln\tau$

El espacio S comprendido por el spindle y la copa del viscosímetro de la Figura 2.5, se define por la ecuación 2.3. Las dimensiones del spíndle y de la copa se presentan en la Tabla 2.2.

$$S = R_c - R_b \quad [2.3]$$

Dónde:

R_c : radio copa (mm)

R_b : radio spindle (mm)

S: espacio spindle-copa(mm)

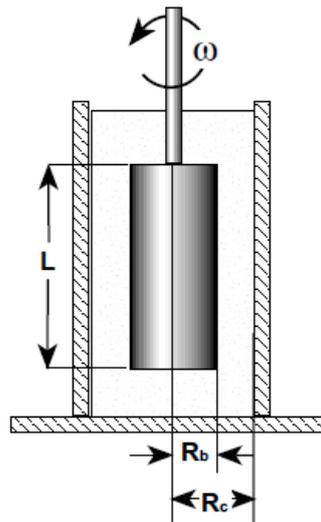


Figura 2.1. Esquema spindle y copa del viscosímetro
(Brookfield Engineering Labs., Inc, More solutions to sticky problems, p. 25)

Tabla 2.2. Dimensiones spindle small adapter

N° Spindle	Radio spindle R_b (mm)	Radio copa R_c (mm)	Longitud efectiva L (mm)	S/R_b
21	16,77	19,05	35,15	0,1
27	11,76	19,05	39,29	0,6

(Brookfield Engineering Labs., Inc, More Solutions To Sticky Problems, p. 39)

Finalmente se realizó el análisis de varianza sobre los resultados de constante de consistencia e índice de comportamiento en orden ascendente y descendente de las tres réplicas.

2.2 DETERMINACIÓN DE LOS NÚMEROS DE POTENCIA DE AGITACIÓN PARA LAS DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACIÓN

2.2.1 DISEÑO EXPERIMENTAL EN LA DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE POTENCIA DE AGITACIÓN

Se determinó la influencia de tres variables sobre el número de potencia de agitación:

- el tipo de agitador: Se emplearon 5 agitadores, turbina rushton, hélice, turbina de 2 aspas, turbina de 4 aspas verticales y turbina de 4 aspas inclinadas. Las dimensiones de los agitadores empleados se presentan en las Figuras 2.3 y 2.4.
- tipo de pulpa de fruta: Se emplearon tres pulpas puras de fruta de mango, guayaba y tomate de árbol, además del aceite SAE20W50
- deflectores: Con y sin deflectores. Las dimensiones se presentan en la Figura 2.2.

Se realizaron tres réplicas en cada tratamiento.

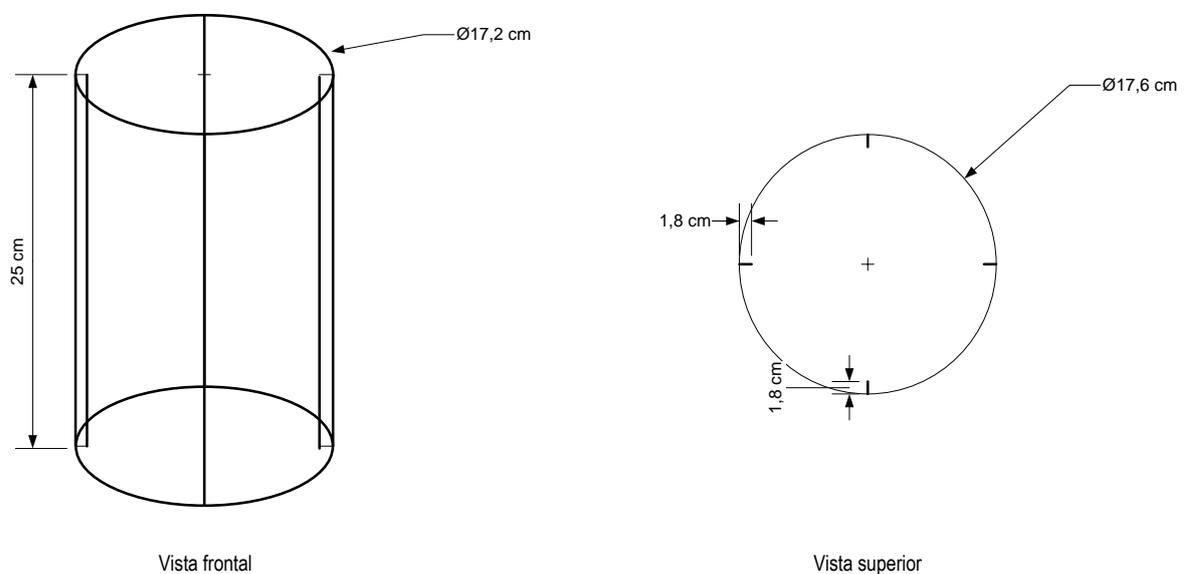


Figura 2.2. Dimensiones deflectores

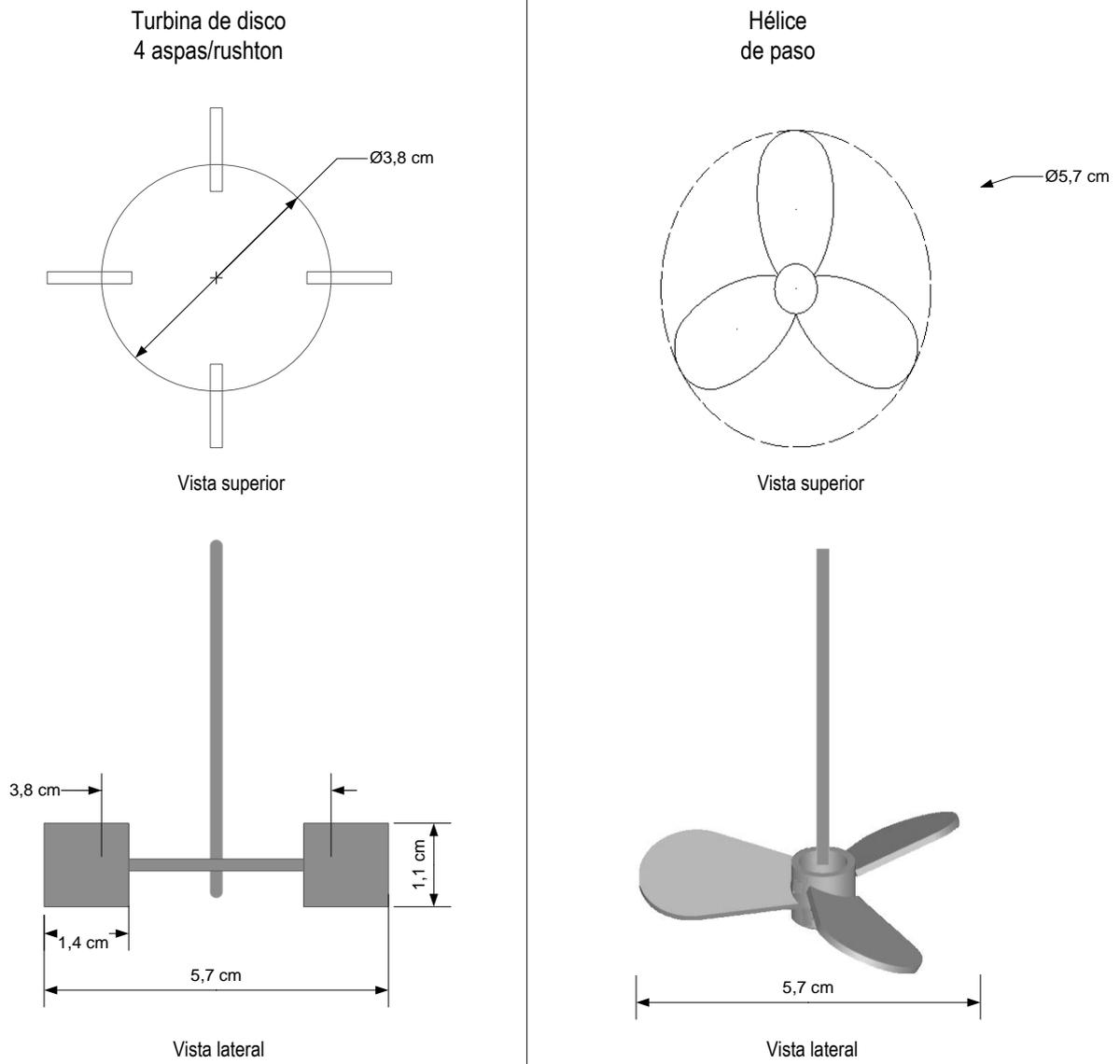


Figura 2.3. Dimensiones agitadores tipo hélice y turbina rushton

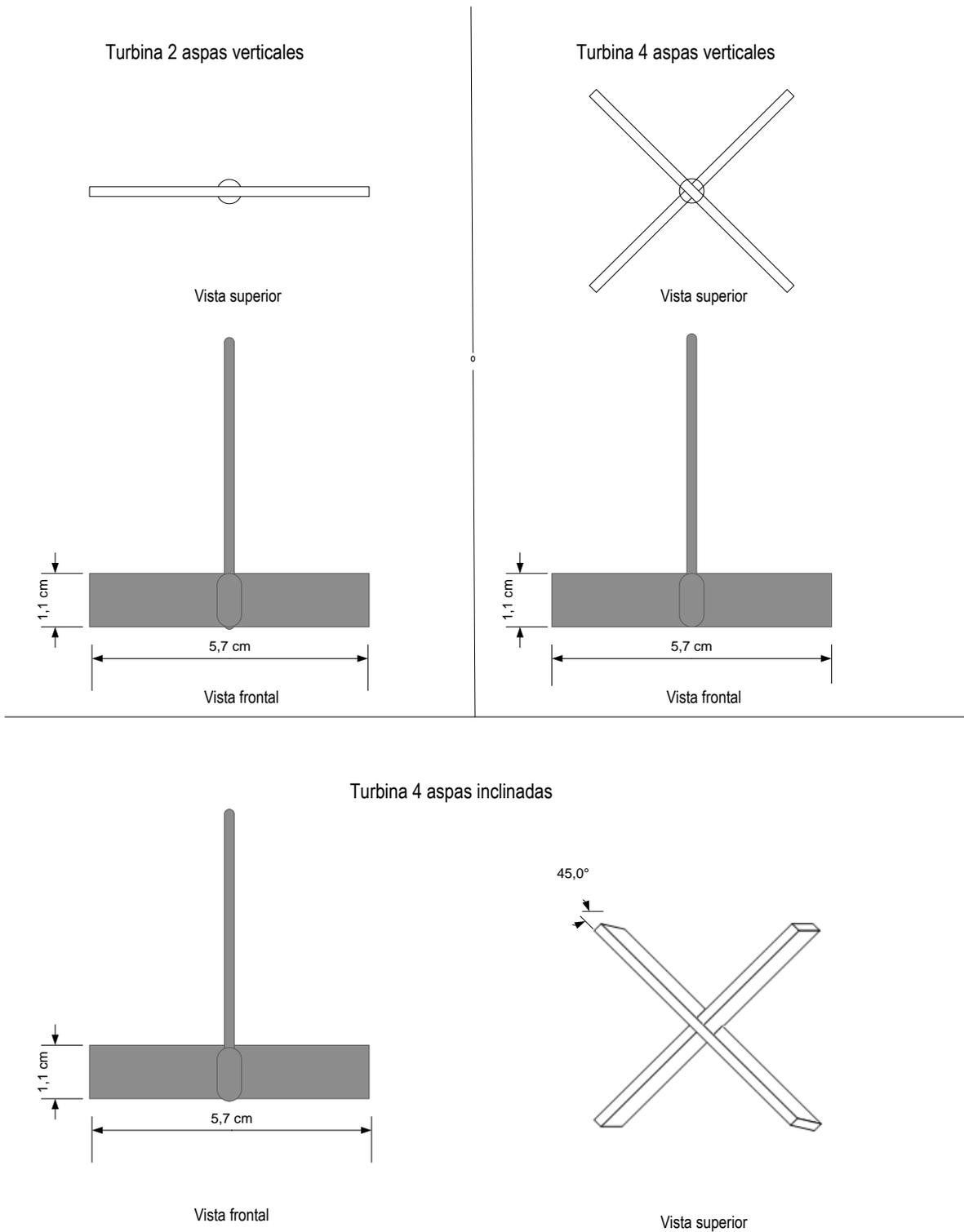


Figura 2.4. Dimensiones agitadores tipo turbina de 2 aspas verticales, de 4 aspas inclinadas y verticales

2.2.2 DESARROLLO PARTE EXPERIMENTAL

Las pruebas se realizaron en un recipiente cilíndrico de 4 litros, volumen mínimo necesario en pruebas de laboratorio (Couper, 2005, p. 318); el diseño de este recipiente se realizó con base en las dimensiones estándar de la Tabla 1.1 y que se muestra en la Figura 2.5.

Primero se determinó la equivalencia de la frecuencia del variador de velocidad de marca ALPHA 5000 con la velocidad de rotación del motor eléctrico trifásico de 1/3 Hp, 220 V y 1600 rpm. Para esto, con el tacómetro de marca EXTECH, modelo 461920 ($\pm 0,5\%$) se midió la velocidad de rotación del motor en rpm a diferentes frecuencias del variador de velocidad.

Antes de iniciar cada prueba, se niveló el sistema de agitación, el tanque y la mesa de soporte del motor. A continuación se colocó el agitador de prueba en el extremo del eje de agitación.

Luego, se llenó el tanque de agitación con la muestra hasta un nivel igual al del diámetro del tanque.

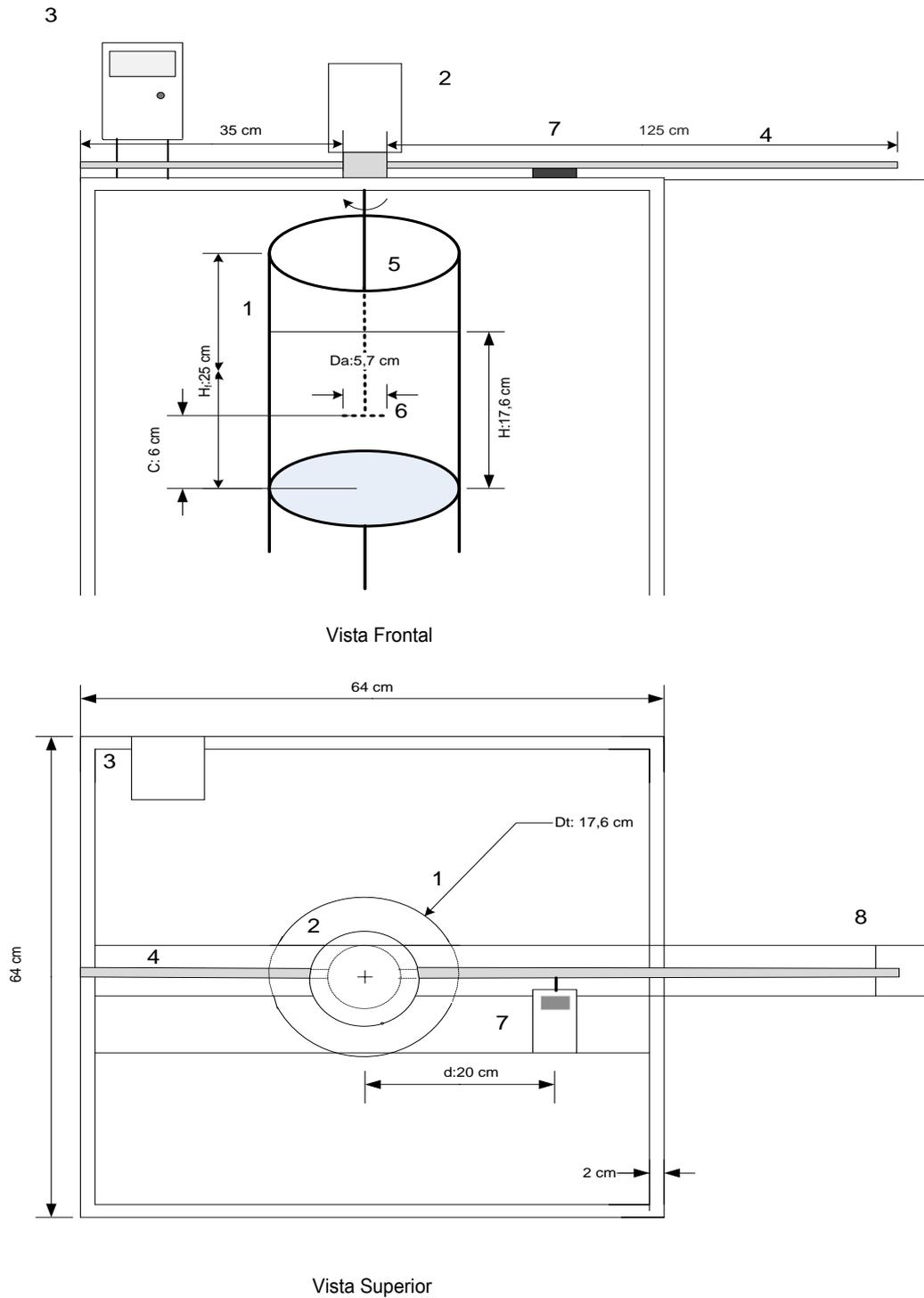
Por otro lado, se sujetó al extremo de la varilla una banda elástica, correspondiente al ítem 8 de la Figura 2.5, con el propósito de reducir los efectos de vibración.

Se colocó el dinamómetro de marca Force Gauge Shimpo FGV_0,5XY a una distancia de 20 cm del centro del motor. Antes de encender el dinamómetro se apartó un poco la varilla y se encendió.

Para encender el equipo de agitación, se apartó la varilla del sensor y gradualmente se la acercó a este, se verificó que dos lecturas de fuerza sean similares y se arrancó la agitación hasta su velocidad máxima, se esperó 5 segundos y se descendió la velocidad hasta cero; se realizó tres arranques de este tipo con el fin de comprobar que la fuerza inicial sea repetible.

Una vez que se encendió el sistema, se procedió a importar las lecturas de fuerza en estado estático y a diferentes velocidades de rotación, se tomó 100 datos a cada velocidad de rotación y se promedió a un valor. Estos datos se encuentran en el Anexo I.

Se agitó cada muestra a 9 diferentes velocidades de 5 a 50 Hz, se empleó agitadores de diferente tipo, hélice, turbina rushton, turbina de 4 aspas verticales, turbina de 4 aspas inclinadas y turbina de 2 aspas verticales; todos estos agitadores de 5,7 cm de diámetro, correspondientes a $\frac{1}{3}$ del diámetro del recipiente. Con el objeto de determinar la repetibilidad de los datos del equipo se tomó los datos de fuerza tres veces en cada prueba.



ÍTEM	Descripción	ÍTEM	Descripción	ÍTEM	Descripción
1	Recipiente de agitación	4	Varilla	7	Dinamómetro
2	Motor eléctrico trifásico	5	Eje de agitación	8	Banda elástica
3	Variador de velocidad	6	Agitador		

Figura 2.5. Esquema del sistema de agitación laboratorio

2.2.3 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE POTENCIA

Se determinó el torque de la fuerza de agitación con la ecuación 2.4.

$$T = F * d \quad [2.4]$$

Dónde:

T : Torque (N.m)

F : Fuerza (N)

d : Distancia, posición del dinamómetro (m)

La potencia a una velocidad de rotación corresponde a la ecuación 2.5 (Chapple *et al.*, 2002, p.364).

$$P = 2\pi N * T \quad [2.5]$$

Dónde:

P : Potencia (w)

N : velocidad de rotación (rps)

El número de potencia de agitación se determinó con la relación adimensional de la ecuación 2.6.

$$P_o = \frac{P}{N^3 \rho D_a^5} \quad [2.6]$$

Se presentó los números de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación del agitador.

2.3 OBTENCIÓN DE LA CONSTANTE DE PROPORCIONALIDAD ENTRE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN Y LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN

2.3.1 METODOLOGÍA DE METZNER Y OTTO

Se calculó el número de potencia de las pulpas de fruta, para velocidades de rotación de 5 a 50 Hz. Se grafica el número de potencia del aceite SAE20W50 en función del número de Reynolds en escala logarítmica. Para determinar la zona lineal se obtuvo los valores logarítmicos del número de potencia y del número de Reynolds, estos valores se ajustaron a la ecuación $\log P_o = x \log Re_m + c$ y mediante una regresión lineal, se escogieron los números de potencia correspondientes a un coeficiente R^2 mayor a 0,96.

El número de potencia del fluido no newtoniano (pulpa de fruta) se igualó al número de potencia del fluido newtoniano (SAE) y de la curva de potencia del fluido newtoniano se determinó el número de Reynolds respectivo a esta igualdad. Se asumió que este número de Reynolds corresponde al del fluido no newtoniano, según la ecuación 2.7 y se obtuvo la viscosidad aparente. Mediante la ecuación 2.8 de la ley de potencia de los fluidos no newtonianos se determinó la velocidad de deformación, finalmente con la ecuación 2.9 se determinó la constante k_s . Realizando los reemplazos respectivo en 2.7 se llega a la ecuación 2.10.

$$Re_N = \frac{ND_a^2 \rho}{\mu_a} \quad [2.7]$$

Dónde:

ρ : Densidad del fluido no newtoniano
(kg/m³).

D_a : Diámetro del agitador (m).

Re_N : Número de Reynolds del fluido newtoniano

μ_a : Viscosidad aparente

$$\mu_a = K\gamma^{n-1} \quad [2.8]$$

$$\gamma = k_s N \quad [2.9]$$

Dónde:

γ : Velocidad de deformación

N: Velocidad de rotación (rps)

K: Índice de consistencia (Pa.sⁿ)

n: Índice de comportamiento reológico

$$k_s = \left(\frac{\rho N^{2-n} D_a^2}{K Re_N} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad [2.10]$$

Dónde:

ρ : Densidad del fluido no newtoniano (kg/m³).

D_a : Diámetro del agitador (m).

Re_N : Número de Reynolds del fluido newtoniano

Este método se realizó para cada pulpa de fruta a iguales condiciones que las del fluido newtoniano SAE.

2.3.2 METODOLOGÍA DE LA PENDIENTE

Se determinó la constante Kp promedio de los puntos correspondientes a la zona lineal del fluido newtoniano (SAE), mediante la ecuación 1.11.

Se determinó la zona lineal del fluido no newtoniano (pulpa de fruta), para lo cual se determinaron los valores logarítmicos del número de potencia de agitación y del número de Reynolds modificado, obtenido con la ecuación 1.9. Estos valores

se ajustaron a la ecuación $\log P_o = x \log Re_m + c$ y mediante una regresión lineal se escogieron los puntos correspondientes a un coeficiente R^2 mayor a 0.96.

Se determinó la constante Kp_n , con los puntos que correspondientes a la zona lineal, mediante la ecuación 1.12.

La constante k_s se obtuvo mediante la ecuación 1.16.

2.3.3 METODOLOGÍA DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD

En este trabajo se propone una nueva metodología para determinar la velocidad de deformación a partir de la velocidad de rotación, la cual se explica a continuación.

Se asumió que el gradiente de velocidad en el interior del tanque varía linealmente y que por lo tanto se describen por la ecuación 2.11, donde la velocidad en el extremo del agitador corresponde a V_1 y la velocidad en la pared se define por V_2 , la cual es nula dado que la capa de fluido cercana a la pared se asume fija. La velocidad de deformación será proporcional a este valor, siendo f la constante de proporcionalidad.

$$\gamma = f \left(\frac{\Delta V}{\Delta R} \right) = f \left(\frac{V_1 - V_2}{R_t - R_a} \right) \quad [2.11]$$

Dónde:

ΔV : Gradiente de velocidad a través del recipiente de agitación

ΔR : Gradiente radial

R_t : Radio del recipiente de agitación

R_a : Radio del agitador

V_1 : Velocidad del fluido en el extremo del agitador

V_2 : Velocidad del fluido en la pared del recipiente

f : la constante de proporcionalidad del gradiente de velocidad

La velocidad del fluido en el extremo del agitador corresponde a la velocidad lineal o periférica del agitador, como se expresa en la ecuación 2.12.

$$V_1 = 2\pi NR_a \quad [2.12]$$

Reemplazando la ecuación 2.10 en 2.9, la velocidad de deformación aproximada en el interior de un recipiente de agitación se expresó en función de las dimensiones del radio del agitador y del recipiente de agitación en la ecuación 2.13.

$$\gamma = f\left(\frac{\pi D_a N}{R_t - R_a}\right) \quad [2.13]$$

Reemplazando los valores del recipiente de agitación y considerando que para el sistema de agitación de este estudio, la relación entre el diámetro del agitador y del tanque es de 1/3, la relación de la velocidad de deformación y la velocidad de rotación se expresa en la ecuación 2.14

$$\gamma = 3,1 * f * N \quad 2.14]$$

2.4 OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE POTENCIA DE AGITACIÓN

Las curvas de potencia se representaron con el número de potencia de agitación en función del número de Reynolds en un gráfico a escala logarítmica, el número de Reynolds se determinó por las metodologías detalladas en el numeral 2.4.1, 2.4.2 y 2.4.3:

- Metzner y Otto. La velocidad de deformación se determinó con la constante de Metzner y Otto k_s de la ecuación 1.9, particular para cada pulpa de fruta y agitador. La viscosidad aparente se determinó con la ecuación 1.3. El número Reynolds se obtuvo con la ecuación 1.8.
- Método de la pendiente. La constante k_s se determinó con la ecuación 1.14, ésta constante se determinó para cada pulpa de fruta y cada agitador. La velocidad de deformación se obtuvo con la ecuación 1.10. La viscosidad

aparente se determinó con la ecuación 1.3. El número de Reynolds se determinó con la ecuación 1.8.

- Gradiente de velocidad. La velocidad de deformación se determinó con la ecuación 2.13. La viscosidad aparente se determinó con la ecuación 1.3. El número de Reynolds se determinó con la ecuación 1.8.

2.4.1 DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA PULPA DE FRUTA AGITADA EN EL NÚMERO DE POTENCIA DE AGITACIÓN

Para determinar el efecto del tipo de pulpa de fruta agitada en el número de potencia de agitación se realizó el análisis de varianza de un factor en el número de potencia de agitación de las pulpas de guayaba, mango, tomate y del aceite SAE, para cada uno de las condiciones de operación. Esta comparación se realizó para diferentes números de Reynolds.

2.4.2 DETERMINACIÓN DEL EFECTO DEL TIPO DE AGITADOR EN EL NÚMERO DE POTENCIA DE AGITACIÓN

Se comparó los resultados obtenidos de las curvas de potencia de agitación de para los diferentes agitadores en cada una de las muestras de SAE20W50, mango, tomate y guayaba. Las especificaciones de los agitadores empleados se ilustran en la Figura 2.2 y 2.3.

2.4.3 DETERMINACIÓN DEL EFECTO DEL USO DE DEFLECTORES EN EL NÚMERO DE POTENCIA DE AGITACIÓN

Para determinar el efecto del uso de deflectores se realizó el mismo procedimiento del acápite 2.5.1. Se colocó 4 deflectores verticales equidistantes en el recipiente de agitación para cada una de las pruebas, las especificaciones de los deflectores se ilustran en la Figura 2.4.

2.5 DISEÑO DE UN SISTEMA DE AGITACIÓN PARA PULPA DE FRUTA

En base de los resultados experimentales, se revisó el diseño del sistema de agitación de la planta procesadora de pulpas de fruta y enlatados ENVAGRIF. Para esto, se midió las dimensiones físicas del tanque de agitación como diámetro, altura, nivel del líquido, posición y diámetro del agitador. Además se consideró las condiciones de operación como el tipo de pulpa agitada, la velocidad de rotación y presencia o ausencia de deflectores.

Se tomaron datos de la corriente eléctrica y voltaje del motor eléctrico usado en la agitación. Mediante la ecuación 2.15 se determinó la potencia eléctrica del motor.

$$P = \sqrt{3} * V * I * \cos\varphi \quad [2.15]$$

Para determinar la potencia de agitación se consideró las pérdidas eléctricas y mecánicas del motor.

Se determinó el número de potencia de agitación teórico para las condiciones establecidas, mediante la curva de potencia de agitación obtenida con un agitador similar al empleado en la planta. Finalmente este valor se comparó con la potencia de agitación instalada en la planta.

3. RESULTADOS

3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA

La caracterización físico química de las pulpas de fruta de mango, guayaba y tomate de árbol se presenta en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Parámetros de densidad, sólidos totales y turbidez

Pulpa de fruta	Densidad (kg/m³)	Sólidos totales (%)	Turbidez (NUT)	° BRIX
Guayaba	1034,4	12,2	45100	8,1
Mango	1072,0	14,8	11670	15
Tomate de árbol	1007,2	9,0	6960	7,4

Los resultados de densidad muestran que la pulpa de mango tiene una mayor densidad por presentar mayor contenido de sólidos totales y solubles.

Los resultados de sólidos solubles de las pulpas de fruta de guayaba, mango y tomate de árbol son similares a las especificaciones técnicas mínimas requeridas por la norma INEN380, valores de 5, 11 y 8 °BRIX respectivamente (NTE INEN, 2008).

La turbidez representa indirectamente el contenido de sólidos suspendidos, en los resultados de las pulpas de frutas muestran la presencia de varios componentes como vitaminas, enzimas, carbohidratos, estas cantidades dependen de la especie de la fruta (Andrade *et al*, 2009, p.13).

3.2 VISCOSIDAD APARENTE DE LAS PULPAS DE FRUTA A DIFERENTES VELOCIDADES DE ROTACIÓN

La relación del esfuerzo cortante con la velocidad de deformación del aceite SAE20W50 se muestra en la Figura 3.1, se observa que existe una tendencia lineal, característica de un fluido newtoniano; mientras que la misma gráfica para la pulpa de fruta de tomate de árbol de la Figura 3.2 presenta una relación

potencial. Similares resultados se encontraron para todas las pulpas de fruta ensayadas.

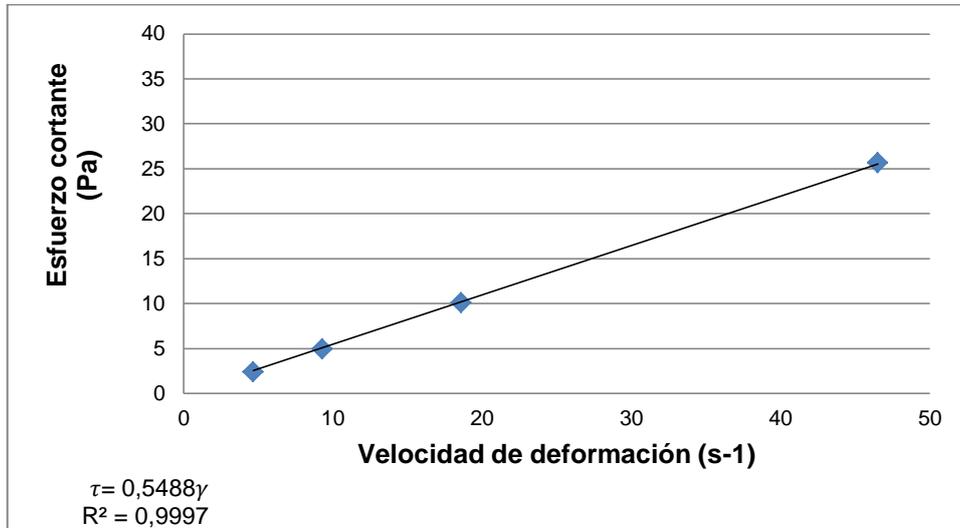


Figura 3.1. Relación esfuerzo cortante en función de la velocidad de deformación, aceite SAE20W50

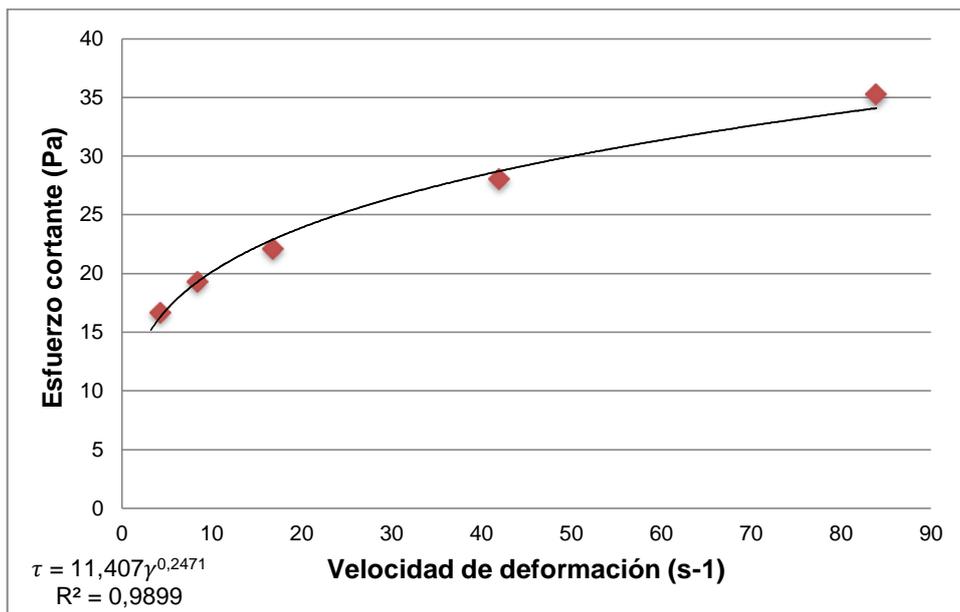


Figura 3.2. Esfuerzo cortante (Pa) en función de la velocidad de deformación (s⁻¹), tomate de árbol

Los resultados de índice de comportamiento reológico e índice de consistencia obtenidos a velocidad de rotación ascendente y descendente se exponen en la Tabla 3.2 para las pulpas de fruta de mango, guayaba y tomate de árbol. El

análisis estadístico demostró que las pulpas de fruta de estudio son independientes del tiempo, ya que el valor estadístico p fue mayor a 0,05.

Tabla 3.2. Resultados de la caracterización reológica de pulpas de fruta en orden ascendente y descendente

Pulpa de fruta	Índice de comportamiento reológico		Índice de consistencia	
	n		K (Pa.s ⁿ)	
	Ascendente	Descendente	Ascendente	Descendente
tomate de árbol	0,238	0,236	12,655	12,638
Mango	0,146	0,135	16,84	17,304
guayaba	0,161	0,178	27,948	26,819
guayaba Puerto Rico*	0,187	0,268	168,63	106,84
guayaba D14*	0,193	0,270	327,61	200,49
guayaba Red*	0,144	0,236	234,47	133,17
guayaba Klom Sall *	0,288	0,307	129,80	122,63

*(Andrade *et al.*, 2009)

Además se corroboró que las pulpas de fruta de tomate de árbol, mango y guayaba presentan un comportamiento no newtoniano pseudoplástico ya que el índice de comportamiento reológico es menor a 1 (Kelessidis y Hatzistamou, 2011, pp. 380-384).

La dependencia o independencia del tiempo de los parámetros reológicos depende de la variedad de la pulpa de fruta, así lo demostraron estudios realizados en diferentes variedades de pulpa de guayaba, estos datos bibliográficos muestran tixotropía en las variedades de Puerto Rico, Red y D14 (Andrade *et al.*, 2009), mientras que para la variedad Klom Sall el tiempo no es un factor influyente.

Los valores medios de los resultados de los parámetros reológicos en orden ascendente y descendente se presentan en la Tabla 3.3. Estos resultados presentan relación con los parámetros de turbidez, densidad, sólidos totales y solubles de la Tabla 3.1.

Tabla 3.3. Constante de consistencia (K) e índice de comportamiento (n) de pulpa de guayaba, mango y tomate

Pulpa de fruta	K (Pa.s ⁿ)	n
Guayaba	27,383 ± 1,644	0,169 ± 0,005
Tomate árbol	12,646 ± 0,769	0,237 ± 0,006
Mango	17,072 ± 1,197	0,141 ± 0,009

$$\bar{x} \pm \sigma (n = 3)$$

Se comprueba que el índice de consistencia de las pulpas de fruta de estudio tiene relación con la turbidez, ya que a mayor turbidez, mayor resulta el índice de consistencia.

Además, una relación semejante se aprecia con la concentración de sólidos solubles °BRIX, el tomate de árbol presenta el menor índice de consistencia por presentar una menor concentración de sólidos solubles, sin embargo entre la guayaba y el mango se tiene una relación opuesta. En la Tabla 3.4 se observa esta comparación con otros resultados bibliográficos.

Tabla 3.4. Comparación de parámetros reológicos con °BRIX de pulpa de mango, guayaba y tomate de árbol

	Concentración (°BRIX)	Índice de consistencia K(Pa.s ⁿ)	Índice de comportamiento Reológico n
Mango* 25°C	7	0,95	0,29
	12	3,67	0,23
	17	10,51	0,20
	22	11,51	0,20
	27	24,54	0,23
Tomate	7,4	12,65	0,24
Guayaba	8,1	27,38	0,17
Mango	15	17,072	0,14

*(Vargas *et al.*, 2006)

Vargas *et al.* (2006), determinaron que existe relación entre las propiedades reológicas y la concentración de sólidos solubles, a mayor concentración de sólidos solubles, se tiene mayor índice de consistencia, en la Tabla 3.4 se

muestran parámetros reológicos de pulpas de mango a diferentes concentraciones de °BRIX (p.32). Estos resultados bibliográficos tienen una relación ascendente porque se trata solo de la pulpa de mango a diferentes diluciones.

En conclusión, los valores de índice de consistencia de pulpas de fruta dependen de la variedad y parámetros físico químico. Por lo que comparar los parámetros reológicos con sus propiedades físicas químicas resulta complejo. Generalmente las pulpas de fruta tienen un comportamiento pseudoplástico.

Las viscosidades aparentes de las pulpas de fruta a diferentes velocidades de deformación se muestran en la Tabla 3.5, la viscosidad aparente decrece conforme se incrementa la velocidad de deformación de acuerdo al índice de comportamiento reológico.

Tabla 3.5. Viscosidad aparente de pulpa de frutas de mango, guayaba y tomate de árbol a diferentes velocidades de deformación (s^{-1})

Pulpa de fruta	Viscosidad aparente μ_a (Pa.s)			
	$\gamma(s^{-1})$	10	100	1000
guayaba		4,041	0,596	0,087
tomate árbol		2,182	0,377	0,065
mango		2,362	0,326	0,045

3.3 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE POTENCIA DE AGITACIÓN A DIFERENTES CONDICIONES

3.3.1 FUERZA DE AGITACIÓN CON DEFLECTORES

Los resultados de las fuerza de agitación medidas a diferentes velocidades de rotación en el equipo de agitación se presentan en las Figuras 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 para las pulpas de mango, guayaba, tomate de árbol y del aceite SAE20W50. Estos resultados corresponden a pruebas realizadas con deflectores para una turbina de 4 aspas verticales con sus respectivas repeticiones.

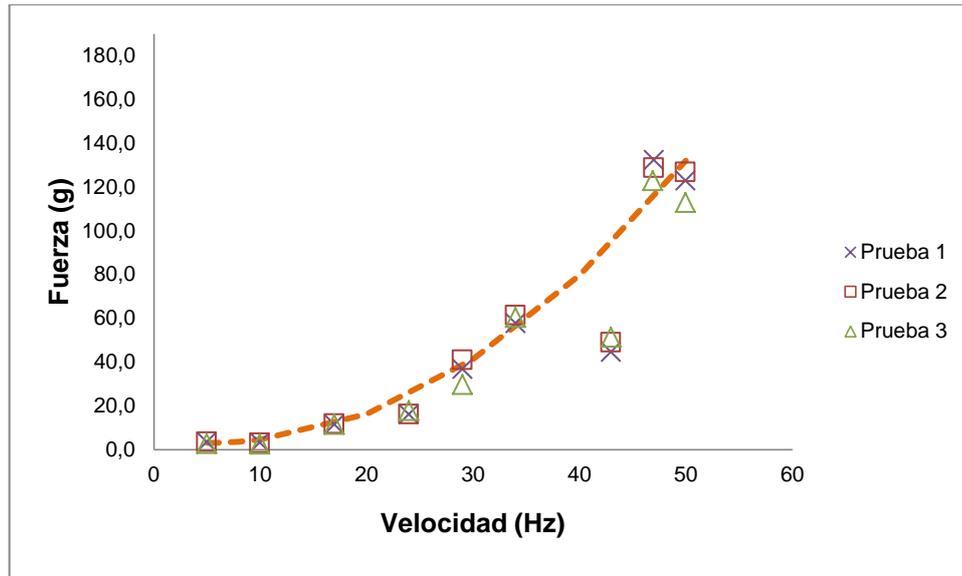


Figura 3.3. Fuerza de agitación guayaba con deflectores para un agitador turbina de 4 aspas verticales

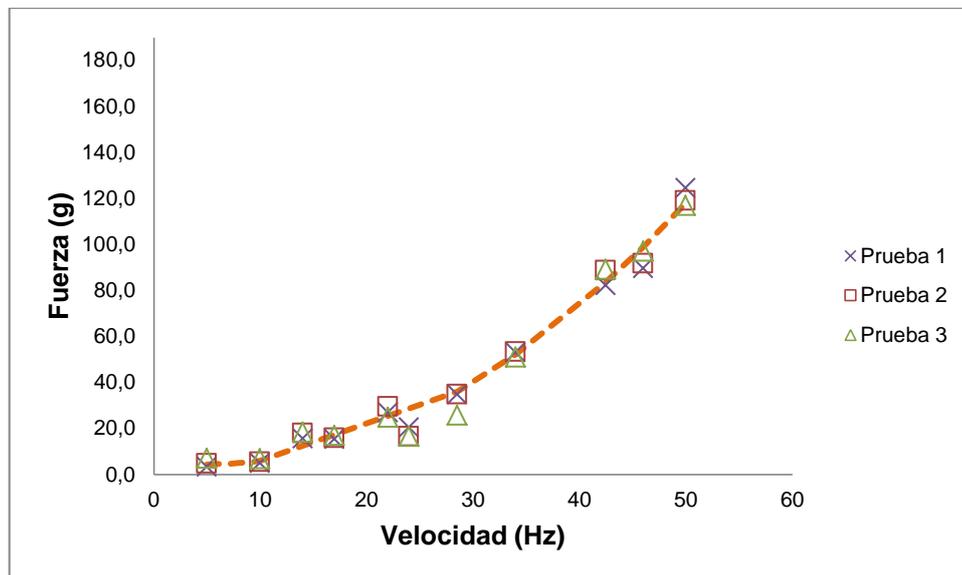


Figura 3.4. Fuerza de agitación mango con deflectores para un agitador turbina de 4 aspas verticales

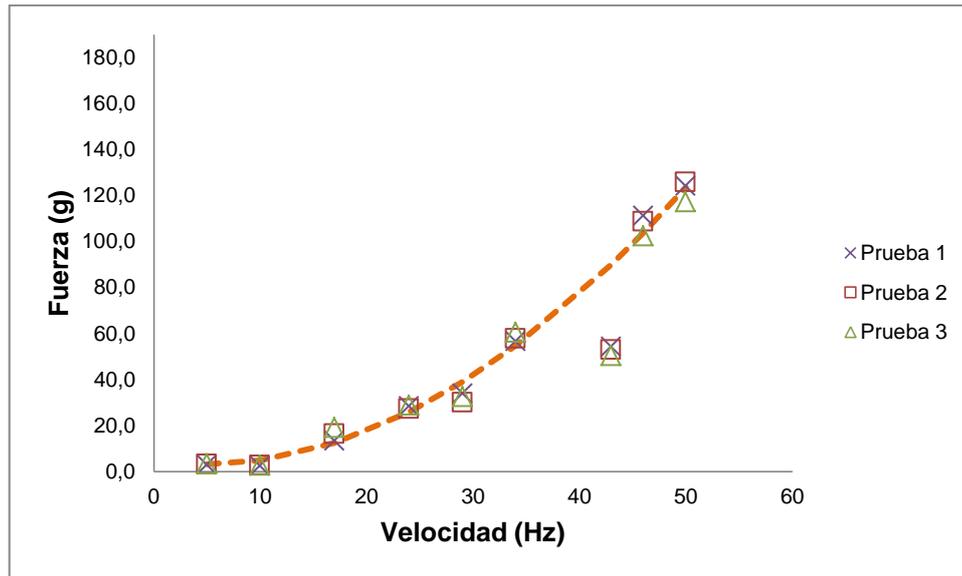


Figura 3.5. Fuerza de agitación tomate de árbol con deflectores para un agitador turbina de 4 aspas verticales

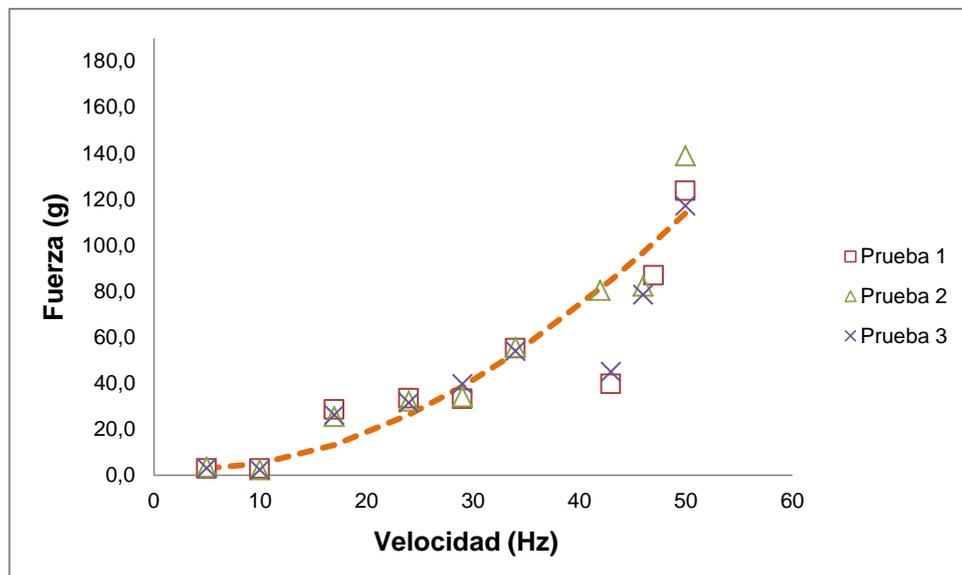


Figura 3.6. Fuerza de agitación sae20w50 con deflectores para un agitador turbina de 4 aspas verticales

Las curvas de fuerza de agitación en función de la velocidad de rotación para los diferentes agitadores tienen una tendencia potencial. En estas curvas se observa que algunos datos se desvían de esta tendencia por los efectos de vibración del sistema de agitación. Los porcentajes de desviación estándar entre las repeticiones de cada prueba estuvieron entre el 6 y 20%, valores aceptables en pruebas experimentales.

Los resultados obtenidos se ajustaron a la ecuación 3.1 por la metodología de los mínimos cuadrados, donde a , b y c son constantes que varían para cada pulpa de fruta y cada condición de operación. La ecuación se propuso basándose en que la velocidad mínima de rotación fue de 5 Hz y para ajustar los resultados a la ecuación potencial alineada al origen se restó este valor a cada velocidad de rotación, este ajuste resultó mejor que cuando no se restaba el valor de 5 a la velocidad de rotación.

$$F = a(N - 5)^b + c \quad [3.1]$$

Los valores de las constantes se presentan en las Tablas 3.6, 3.7 y 3.8.

Tabla 3.6. Constantes de ecuación potencial para pruebas de guayaba con deflectores

Agitador	Ecuación			$F = a(N - 5)^b + c$
	A	b	c	R^2
<i>Con deflectores</i>				
Hélice	7,5E-02	1,9	2,6	0,985
Rushton	2,3E-02	2,2	2,6	0,979
Turbina 2 aspas	1,7E-02	2,4	2,0	0,983
Turbina 4 aspas inclinadas	2,5 E-02	2,2	2,4	0,977
Turbina 4 aspas verticales	4,8E-02	2,1	3,1	0,969

Tabla 3.7. Constantes de ecuación potencial para pruebas de mango con deflectores

Agitador	Ecuación			$F = a(N - 5)^b + c$
	A	b	c	R^2
<i>Con deflectores</i>				
Hélice	8,9E-05	3,8	7,3	0,970
Rushton	3,2E-02	2,2	6,2	0,949
Turbina 4 aspas inclinadas	7,6E-03	2,6	5,2	0,965
Turbina 4 aspas verticales	6,3E-02	2,0	4,8	0,988

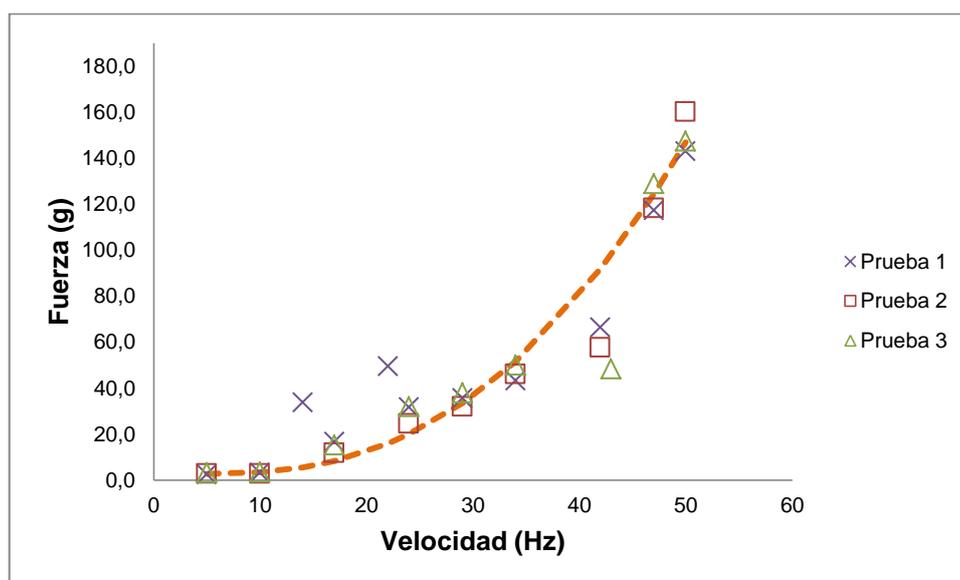
Tabla 3.8. Constantes de ecuación potencial para pruebas de tomate con deflectores

Agitador	Ecuación			$F = a(N - 5)^b + c$
	A	b	c	
<i>Con deflectores</i>				R^2
Hélice	1,4E-02	2,4	2,8	0,966
Rushton	6,5E-02	2,0	2,8	0,980
Turbina 2 aspas	3,4E-02	2,2	2,5	0,972
Turbina 4 aspas inclinadas	4,5E-02	2,1	2,8	0,991
Turbina 4 aspas verticales	7,8E-02	1,9	3,1	0,990

Unidades: F (g), N (Hz)

3.3.2 FUERZA DE AGITACIÓN SIN DEFLECTORES

Los resultados de la fuerza de agitación a diferentes velocidades de rotación para las pulpas de mango, guayaba, tomate de árbol y del aceite SAE20W50 de las pruebas sin deflectores y para una turbina de 4 aspas verticales, se muestran en las Figuras 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10.

**Figura 3.7.** Fuerza de agitación guayaba sin deflectores para un agitador turbina de 4 aspas verticales

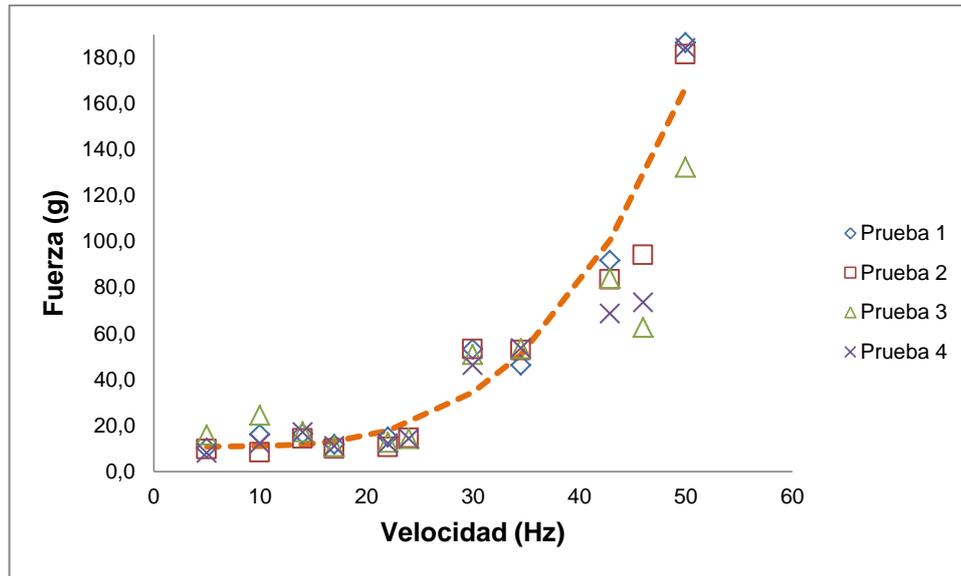


Figura 3.8. Fuerza de agitación mango sin deflectores para un agitador turbina de 4 aspas verticales

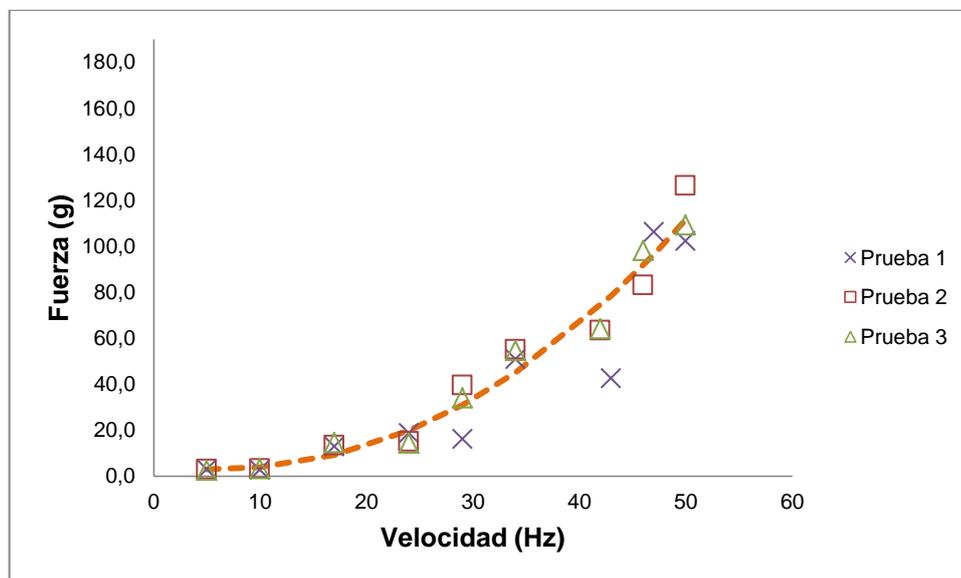


Figura 3.9. Fuerza de agitación tomate de árbol sin deflectores para un agitador turbina de 4 aspas verticales

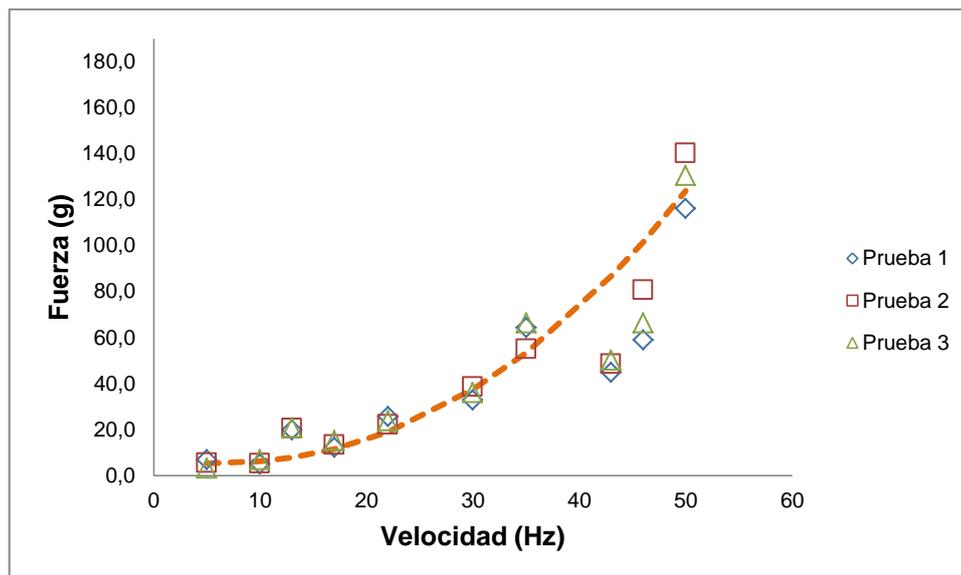


Figura 3.10. Fuerza de agitación sae20w50 sin deflectores para un agitador turbina de 4 aspas verticales

Al igual que los resultados de fuerza de agitación de las pruebas con deflectores, los resultados de las pruebas sin deflectores para todos los agitadores tienen una tendencia potencial. Las constantes a , b y c de la ecuación 3.1 se muestran en la Tabla 3.9, 3.10 y 3.11.

Tabla 3.9. Constantes de ecuación potencial para pruebas de guayaba sin deflectores

Agitador	Ecuación			$F = a(N - 5)^b + c$
	a	b	c	
<i>Sin deflectores</i>				R^2
Hélice	3,2E-02	2,2	3,1	0,991
Rushton	5,8E-02	2,0	2,7	0,986
Turbina 2 aspas	2,2E-02	2,3	2,4	0,988
Turbina 4 aspas inclinadas	3,9E-02	2,1	2,5	0,979
Turbina 4 aspas verticales	1,2E-02	2,5	2,7	0,987

Tabla 3.10. Constantes de ecuación potencial para pruebas de mango sin deflectores

Agitador	Ecuación			$F = a(N - 5)^b + c$
	a	b	c	R^2
<i>Sin deflectores</i>				
Hélice	6,3E-02	1,8	8,3	0,988
Rushton	3,5E-03	2,8	8,6	0,989
Turbina 2 aspas	1,0E-02	2,5	6,9	0,941
Turbina 4 aspas inclinadas	2,4E-03	2,9	12,5	0,991
Turbina 4 aspas verticales	7,3E-04	3,2	10,9	0,949

Tabla 3.11. Constantes de ecuación potencial para pruebas de tomate sin deflectores

Agitador	Ecuación			$F = a(N - 5)^b + c$
	a	b	c	R^2
<i>Sin deflectores</i>				
Hélice	3,3E-02	2,2	2,6	0,974
Rushton	8,1E-02	1,9	3,0	0,986
Turbina 2 aspas	3,9E-02	2,1	3,0	0,970
Turbina 4 aspas inclinadas	1,5E-02	2,4	2,2	0,981
Turbina 4 aspas verticales	3,0E-02	2,2	2,8	0,969

Unidades: F (g), N (Hz)

3.3.3 NÚMERO DE POTENCIA DE AGITACIÓN CON DEFLECTORES

Los números de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación de las pulpas de fruta de mango, guayaba y tomate de árbol con deflectores se muestran en las Figuras 3.11-3.15.

En las primeras velocidades de rotación se observa una zona lineal decreciente y a continuación se presenta un cambio de tendencia. La zona lineal correspondería al régimen laminar. Además, existe una notoria diferencia del número de potencia de agitación entre la pulpa de mango con las pulpas de tomate y guayaba, pero a partir de los 30 Hz los números de potencia de agitación tienden a igualarse.

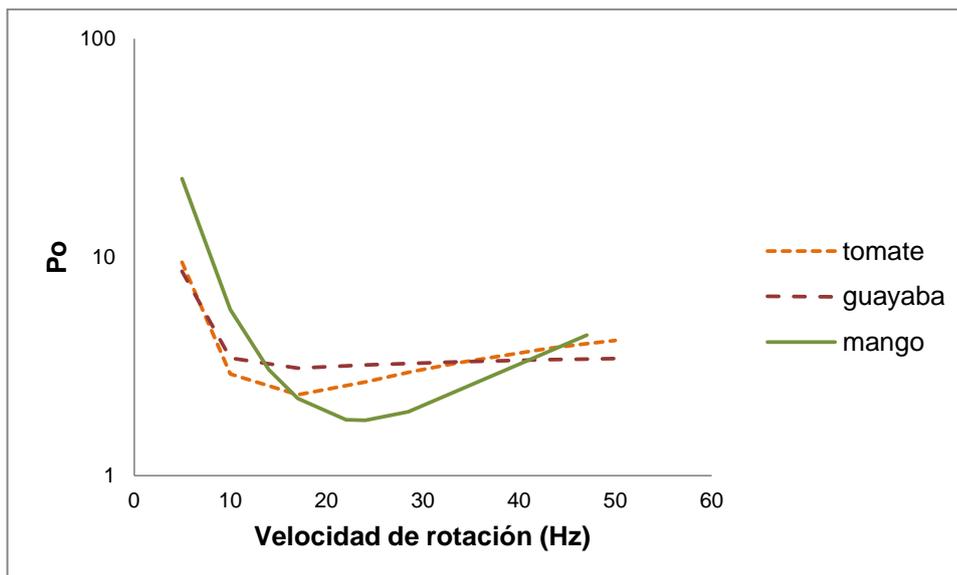


Figura 3.11. Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), hélice con deflectores

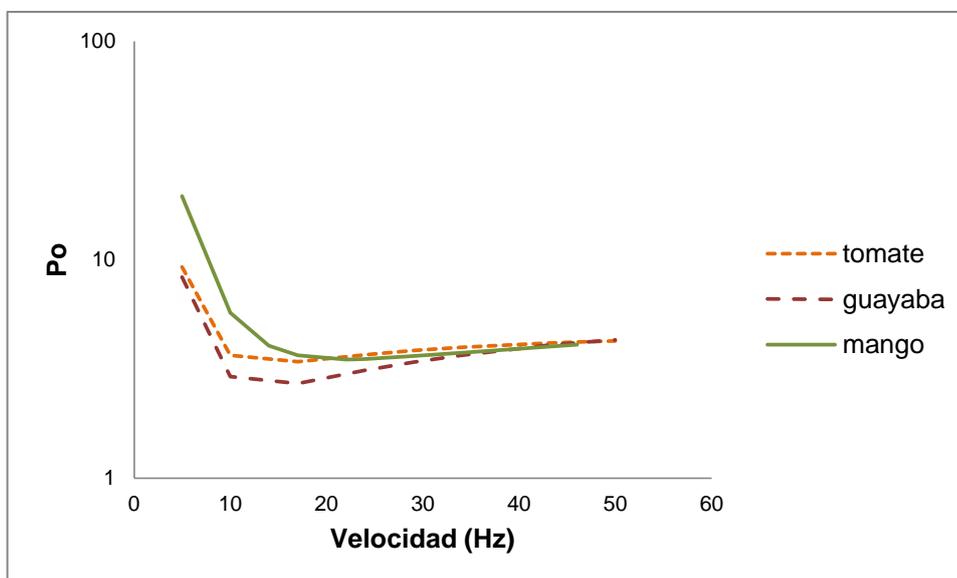


Figura 3.12. Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), rushton con deflectores

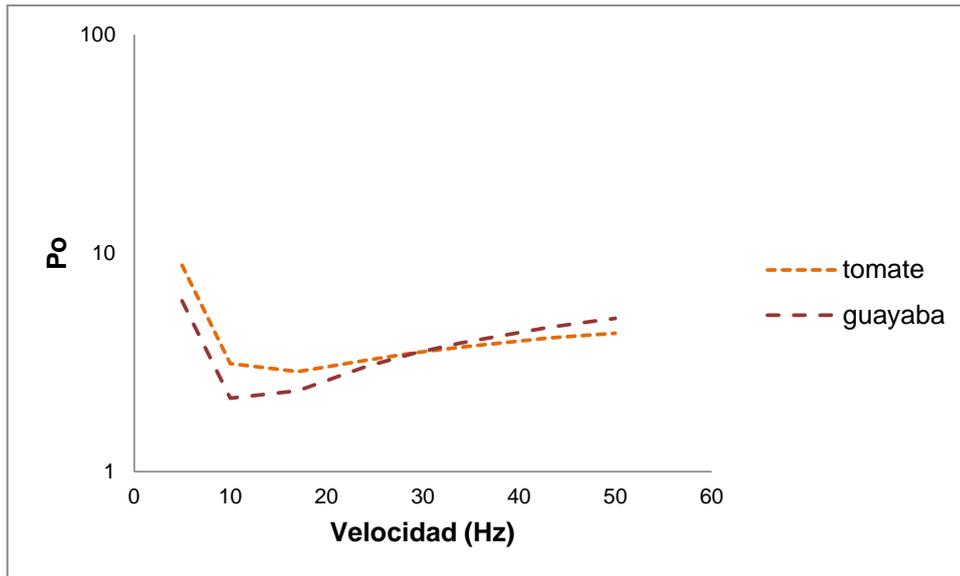


Figura 3.13. Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), turbina de 2 aspas verticales con deflectores

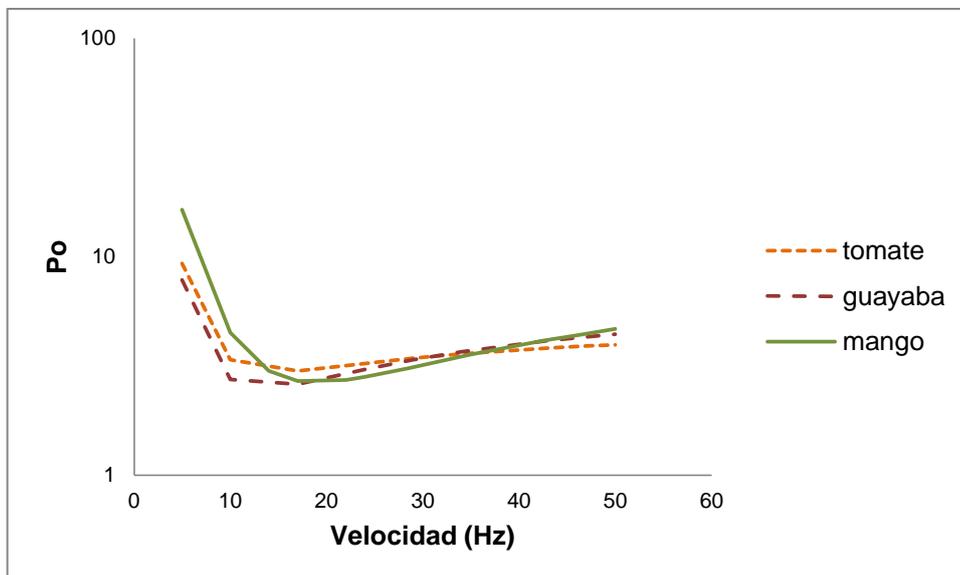


Figura 3.14. Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), turbina 4 aspas inclinadas con deflectores

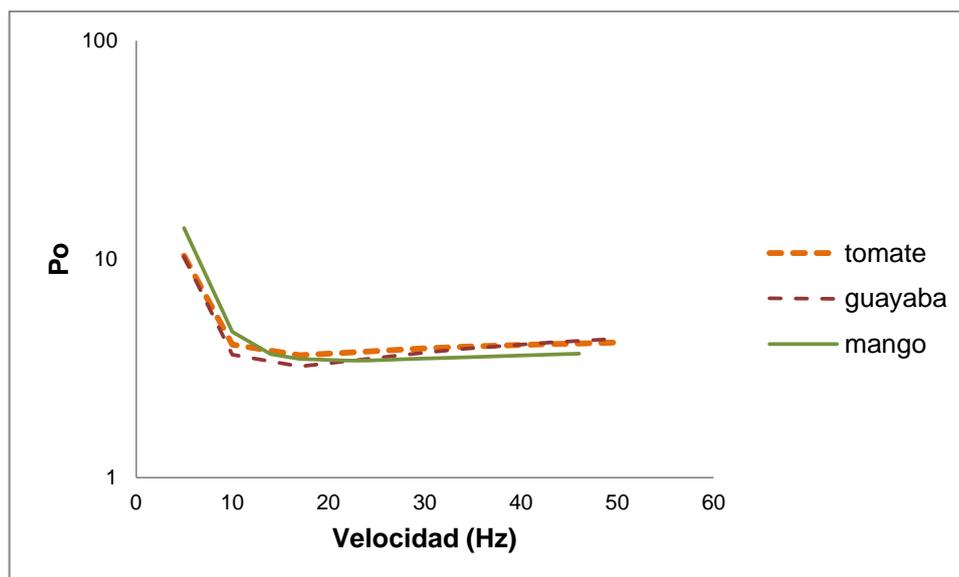


Figura 3.15. Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), turbina 4 aspas verticales con deflectores

3.3.4 NÚMERO DE POTENCIA DE AGITACIÓN SIN DEFLECTORES

Los números de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación sin deflectores muestran un comportamiento similar a los resultados obtenidos con deflectores, se presentan una tendencia lineal en las primeras velocidades y un cambio de tendencia a mayores velocidades de rotación. Estos resultados se muestran en las Figuras 3.16-3.20.

De igual manera, el número de potencia de agitación de la pulpa de mango a 10 Hz, resulta ser mayor que los números de potencia de agitación de las pulpas de tomate y guayaba. Esto se debe a los diferentes parámetros fisicoquímicos y reológicos que presentan las pulpas de fruta. No se observa una relación concreta entre índice de consistencia o el índice de comportamiento reológico con el número de potencia de agitación. Sin embargo, la concentración de sólidos totales y solubles parecen predecir de mejor manera los resultados del número de potencia de agitación para las diferentes pulpas de fruta, a mayor concentración de sólidos solubles se tiene un mayor número de potencia de agitación.

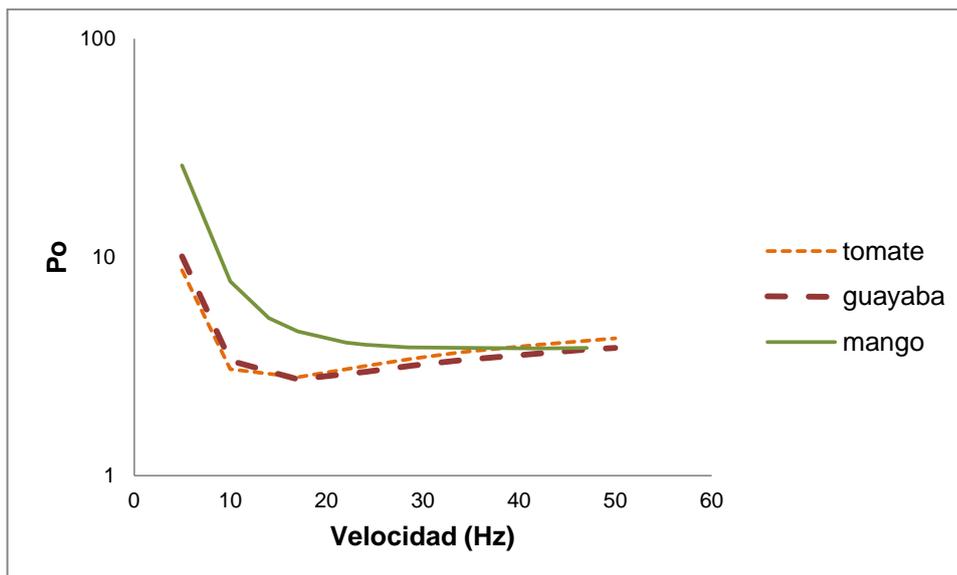


Figura 3.16. Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), hélice sin deflectores

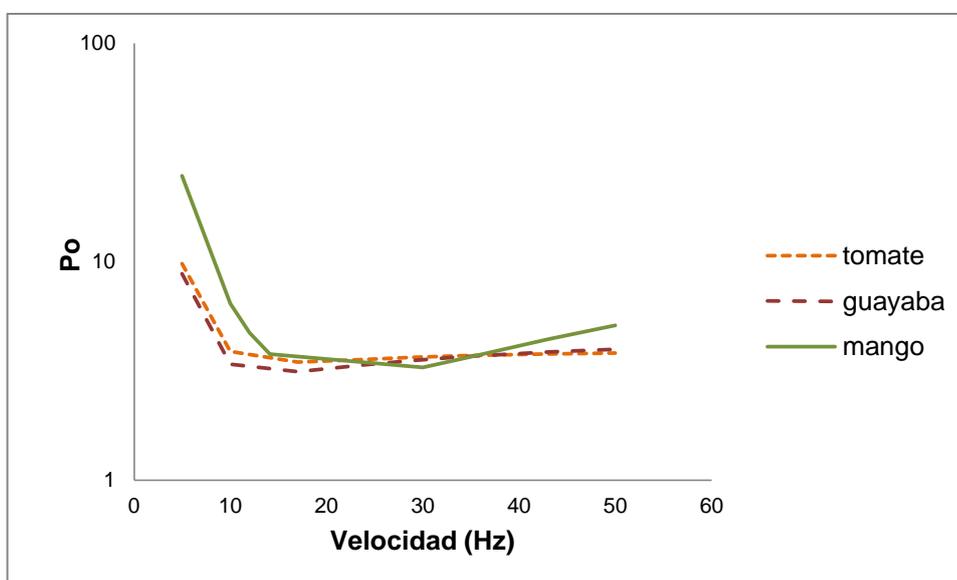


Figura 3.17. Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), rushton sin deflectores

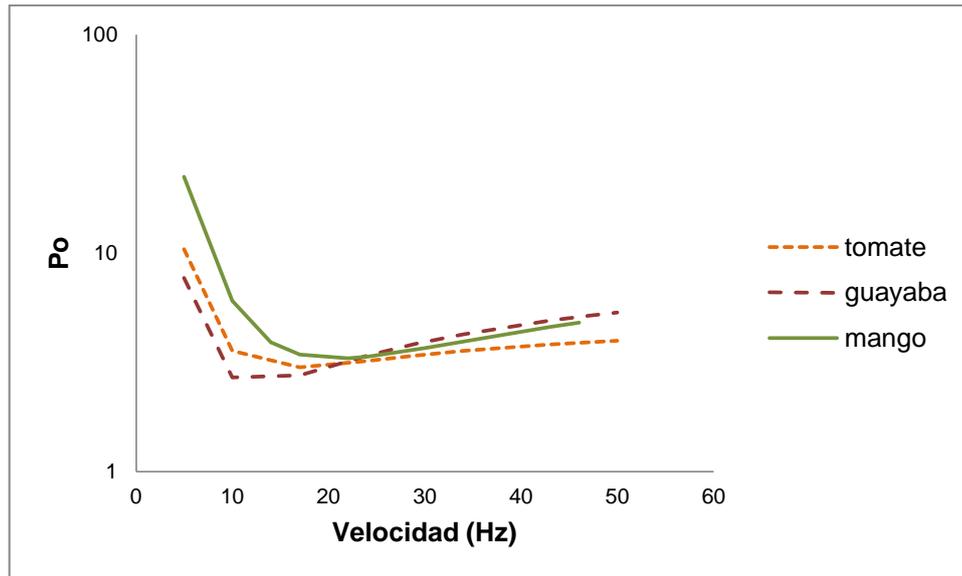


Figura 3.18. Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), turbine 2 aspas verticales sin deflectores

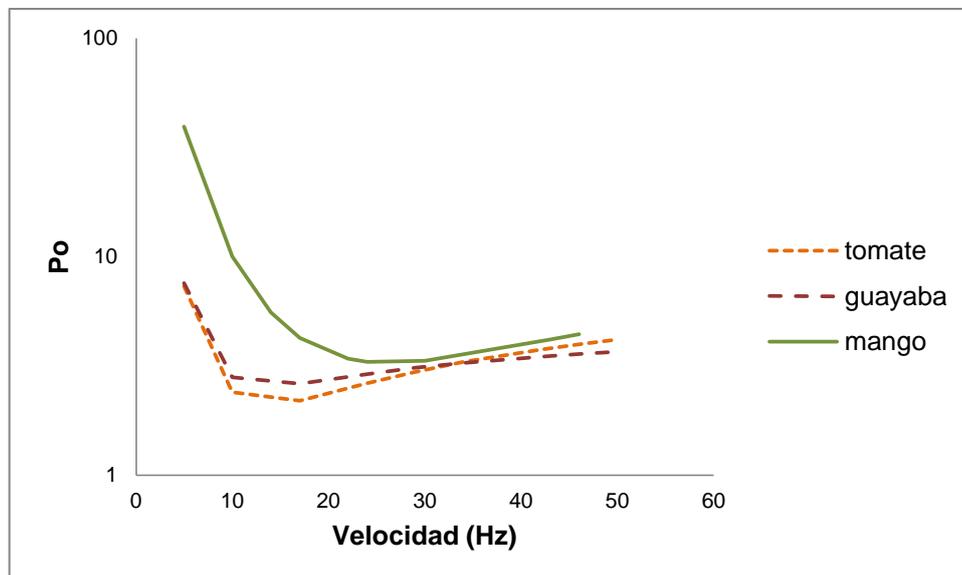


Figura 3.19. Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), turbine 4 aspas inclinadas sin deflectores

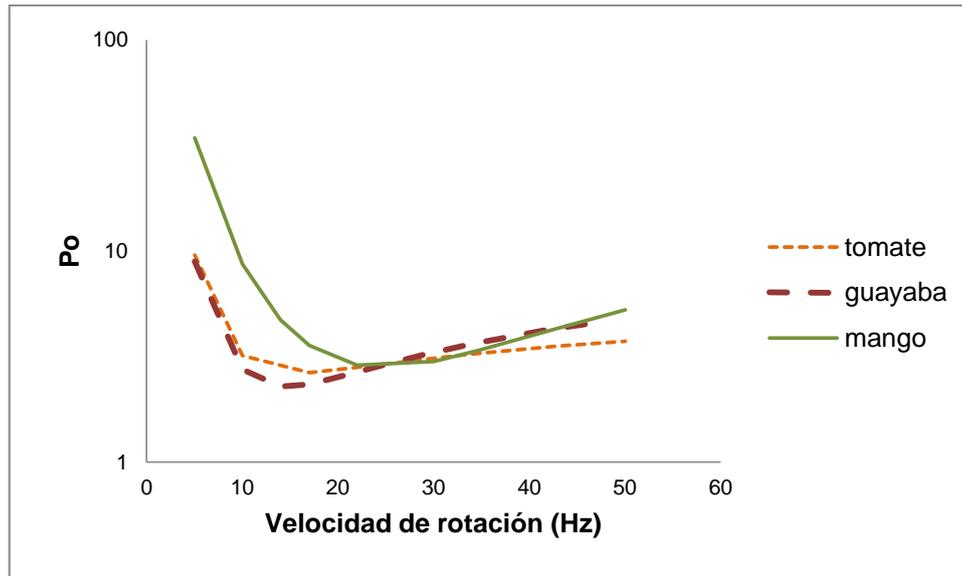


Figura 3.20. Número de potencia de agitación en función de la velocidad de rotación (Hz), turbina 4 aspas verticales sin deflectores

3.4 CURVAS DE POTENCIA DE AGITACIÓN DE SAE20W50

Se obtuvo las curvas de potencia de agitación del fluido newtoniano SAE20W50, con el fin de determinar el número de Reynolds de las pulpas de fruta por las metodologías de Metzner y Otto y de la pendiente. Ambas metodologías son aplicables en el régimen laminar, por lo que fue necesario determinar la zona lineal de estas curvas para cada una de las condiciones de operación.

En la Figura 3.21 se presenta la curva de potencia de agitación del fluido newtoniano SAE20W50 con deflectores para los diferentes agitadores.

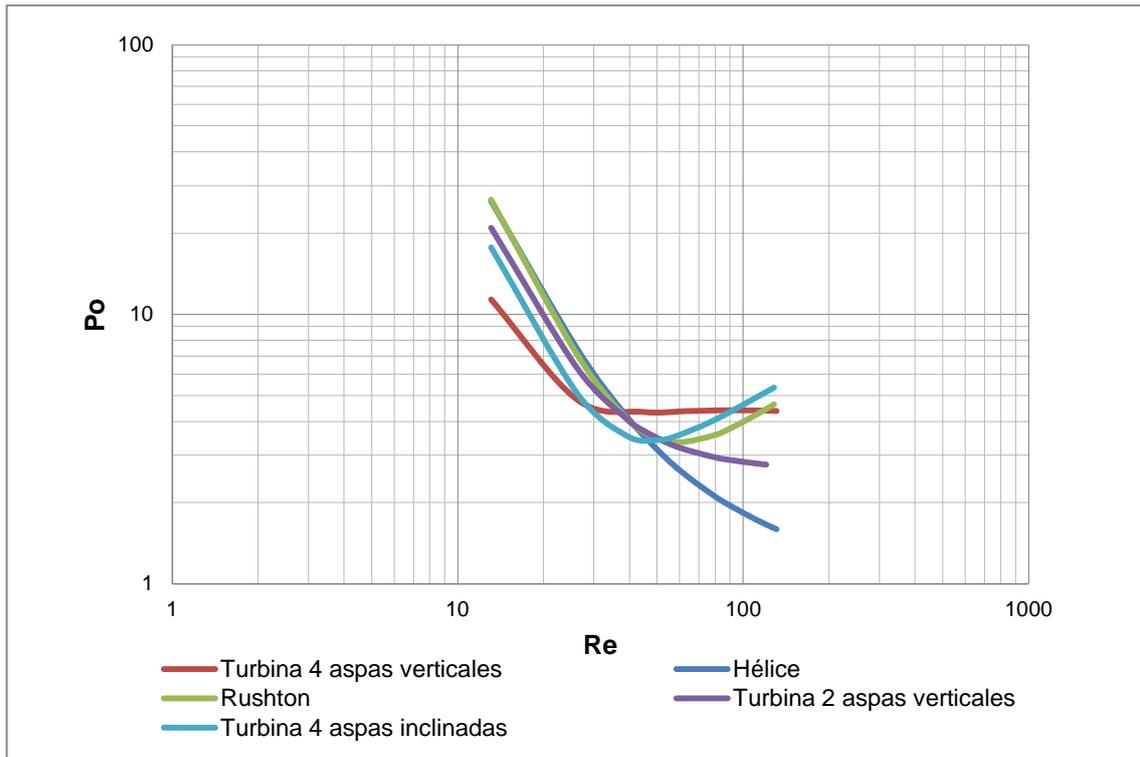


Figura 3.21. Curva de potencia de agitación SAE20W50 con deflectores, agitadores de hélice, turbina rushton, turbina de 4 aspas verticales e inclinadas, turbina de 2 aspas verticales

En pruebas realizadas sin deflectores es importante analizar la dependencia del número de potencia de agitación con el número de Froude. De acuerdo a la ecuación $P_o = ARe^x Fy^y$, el exponente y es función del número de Reynolds según la ecuación $\frac{a - \log Re}{b}$, en bibliografía se encontró que las constantes a y b están en el orden de 2 y 18 respectivamente, estos valores fueron usados en este trabajo para determinar el exponente y y para obtener las curvas de potencia sin deflectores en función del número de Froude ($\frac{P_o}{Fr^y}$ vs Re). En la Figura 3.22 se presenta la curva de potencia de agitación del fluido newtoniano SAE20W50 sin deflectores para los diferentes agitadores, en estas curvas no se encontró influencia del número de Froude sobre el número de potencia de agitación, ya que los valores de $1/Fr^y$ calculados para los diferentes números de Reynolds comprendieron valores entre 0,99 y 1,18. El régimen donde ocurre la agitación es un factor determinante, en bibliografía se menciona que existe una influencia del número de Froude sobre el número de potencia para números de Reynolds

mayores a 300, en estas curvas se tiene números Reynolds menores (Aguado, 1999, p. 41).

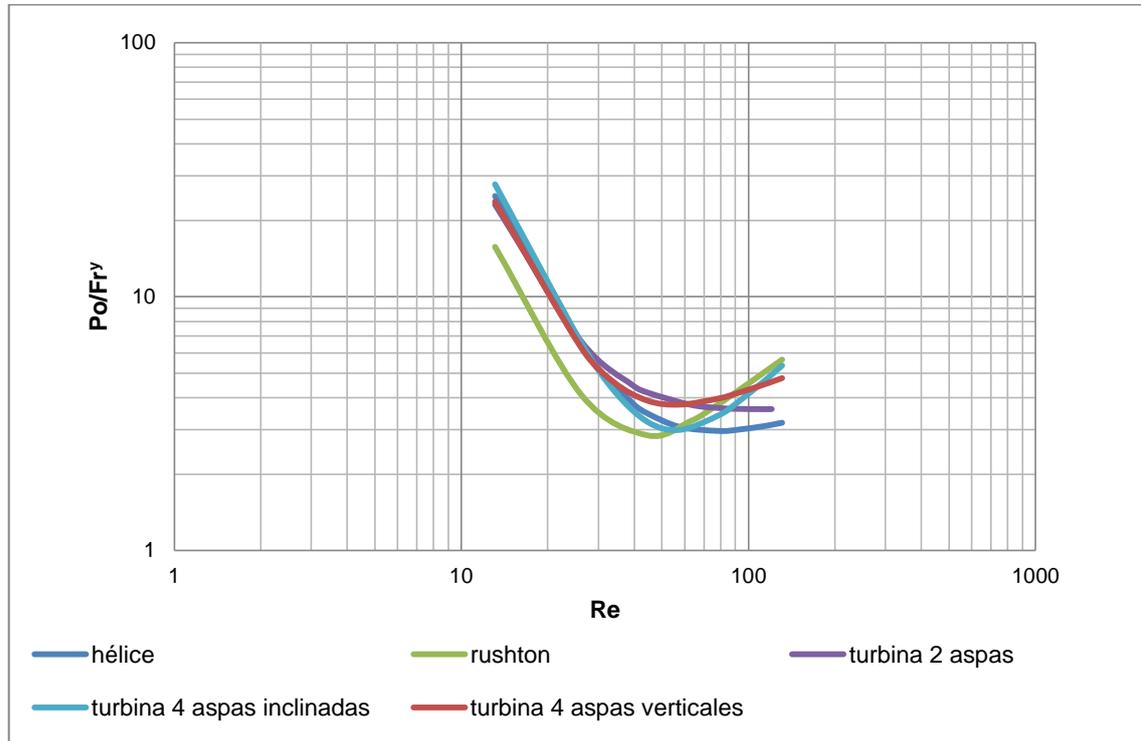


Figura 3.22. Curva de potencia de agitación SAE20W50 sin deflectores, agitadores de hélice, turbina rushton, turbina de 4 aspas verticales e inclinadas, turbina de 2 aspas verticales

Las curvas de potencia de agitación del aceite SAE20w50 presentan una tendencia lineal en números de Reynolds menores a 50. Para identificar los puntos correspondientes a la zona lineal, se ajustaron los valores logarítmicos del número de potencia y del número de Reynolds a la ecuación $\log P_o = x \log Re + \log A$ y mediante una regresión lineal de estos datos, se escogieron los puntos correspondientes a un coeficiente cuadrático R^2 mayor a 0,96.

En la Figura 3.23 se presenta un ejemplo de un agitador tipo hélice con deflectores, en la cual se observa que los primeros 7 puntos de la curva se ajustan a una línea recta, el coeficiente cuadrático de la regresión lineal R^2 es de 0,973. En la Figura 3.24 se muestra un ejemplo sin deflectores de un agitador tipo hélice, en este gráfico 4 puntos corresponden a la zona lineal, el coeficiente cuadrático de la regresión lineal es de 0,984.

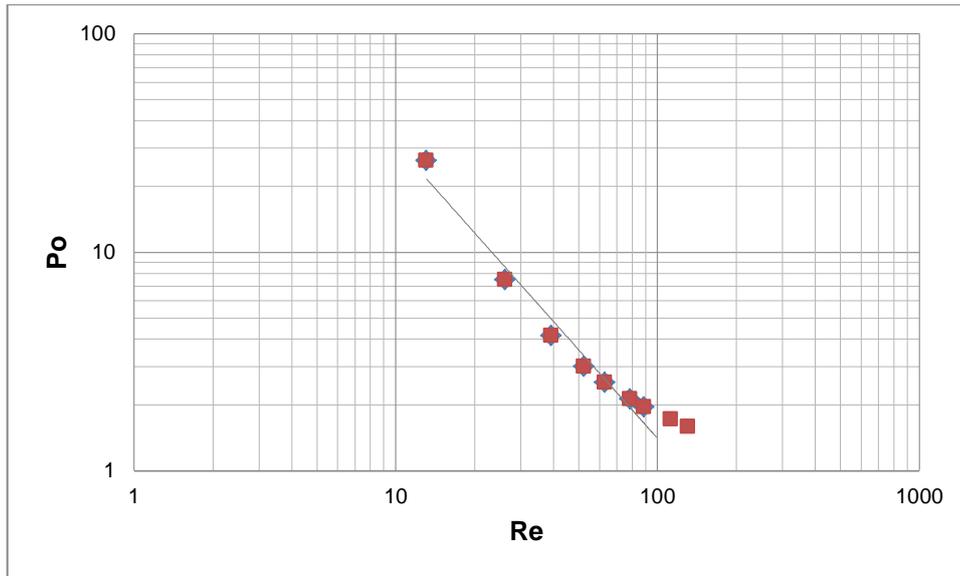


Figura 3.23. Curva de potencia de agitación de hélice con deflectores para SAE20W50

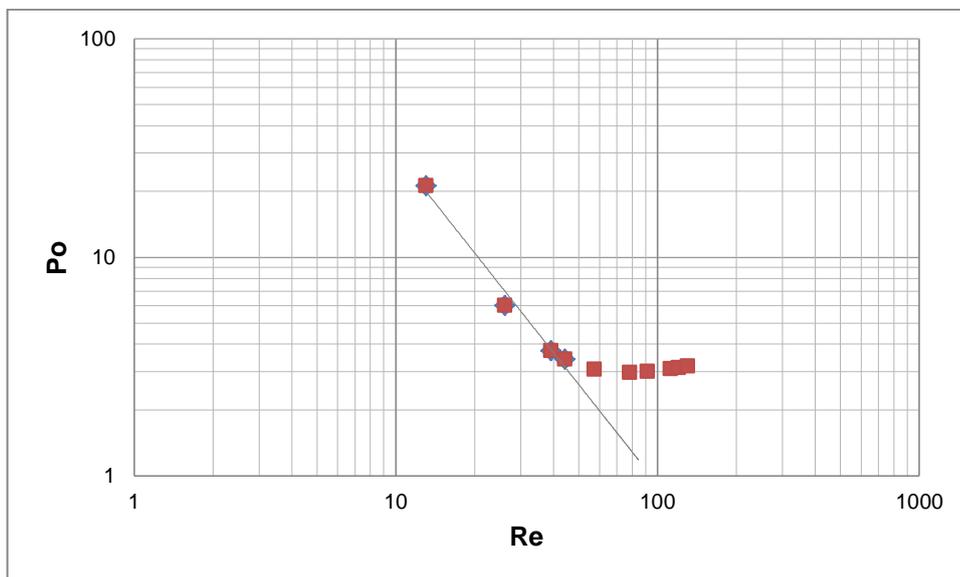


Figura 3.24. Curva de potencia de agitación de hélice sin deflectores para SAE20W50

La zona lineal del aceite SAE20W50 se resume en la Tabla 3.12 para los diferentes agitadores con y sin deflectores.

Tabla 3.12. Zona lineal del aceite SAE20W50

Agitador	Número de puntos	Número de Potencia $Po>$	R^2
Pruebas con deflectores			
Hélice	7	1,96	0,973
Rushton	4	3,47	0,979
Turbina 2 aspas	5	3,24	0,963
Turbina 4 inclinadas	3	3,53	0,976
Turbina 4 verticales	2	4,83	1
Pruebas sin deflectores			
Hélice	4	3,41	0,984
Rushton	3	2,79	0,938
Turbina 2 aspas	4	4,12	0,971
Turbina 4 inclinadas	4	3,16	0,986
Turbina 4 verticales	4	3,83	0,962

Los resultados de la pendiente decreciente x de la ecuación $\log P_o = x \log Re + \log A$ de las curva de potencia de agitación del SAE, se encuentran entre -1,7 a -1,2. En bibliografía, las curvas de potencia de agitación de fluidos newtonianos en escala logarítmica tienen una pendiente de -1, esta diferencia se debe al régimen laminar de estudio. En bibliografía este régimen se encuentran en números de Reynolds menores a 10 o 30, mientras que en este trabajo se presenta entre números de Reynolds de 10-50 (Chhabra y Richardson, 2008, p. 385).

3.5 DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE DE PROPORCIONALIDAD DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN Y LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN

3.5.1 OBTENCIÓN DE k_s POR LA METODOLOGÍA DE METZNER Y OTTO

Los números de potencia de agitación de las pulpas de fruta que corresponden a la zona lineal de las curvas de potencia de agitación de SAE20W50 para las diferentes condiciones se muestran en la Tabla 3.13 y 3.14.

La mayor parte de los números de potencia de las pulpas de fruta calculados, se encuentran por debajo de la zona lineal del fluido newtoniano SAE, a excepción de los números de potencia obtenidos a una velocidad de rotación de 5 o 10 Hz. Se seleccionaron solo los valores decrecientes, ya que existe un cambio de inflexión y los números de potencia que se incrementan corresponderían a otro régimen.

Tabla 3.13. Números de Reynolds correspondientes a los números de potencia de las pulpas de Guayaba, Mango y Tomate con deflectores

HÉLICE CON DEFLECTORES							
Velocidad de rotación (Hz)	Po Guayaba	$Re_{sae}=Re_G$	Po Mango	$Re_{sae}=Re_M$	Po tomate	$Re_{sae}=Re_T$	
5	8,61	20,48	22,82	11,28	9,44	19,28	
10	3,45	41,68	5,74	27,25	2,91	49,55	
14	3,10	46,31	3,05	47,12	2,34	64,48	
17			2,26	67,81			
RUSHTON CON DEFLECTORES							
Velocidad de rotación (Hz)	Po Guayaba	$Re_{sae}=Re_G$	Po Mango	$Re_{sae}=Re_M$	Po tomate	$Re_{sae}=Re_T$	
5	8,32	22,18	19,45	15,47	9,26	21,15	
10			5,71	26,66	3,64	37,14	
14			4,02	33,53			
17			3,64	37,19			
22			3,49	39,42			
TURBINA 2 CON DEFLECTORES							
Velocidad de rotación (Hz)	Po Guayaba	$Re_{sae}=Re_G$	Po Mango	$Re_{sae}=Re_M$	Po tomate	$Re_{sae}=Re_T$	
5	6,43	21,05			8,44	17,72	
10							
TURBINA 4 INCLINADAS CON DEFLECTORES							
Velocidad de rotación (Hz)	Po Guayaba	$Re_{sae}=Re_G$	Po Mango	$Re_{sae}=Re_M$	Po tomate	$Re_{sae}=Re_T$	
5	7,82	21,78	16,41	16,01	9,46	20,05	
10			4,49	29,22			
TURBINA 4 VERTICALES CON DEFLECTORES							
Velocidad de rotación (Hz)	Po Guayaba	$Re_{sae}=Re_G$	Po Mango	$Re_{sae}=Re_M$	Po tomate	$Re_{sae}=Re_T$	
5	10,22	16,77	15,12	12,55	10,34	16,62	
10			4,96	46,66			

Tabla 3.14. Números de Reynolds correspondientes a los números de potencia de las pulpas de Guayaba, Mango y Tomate sin deflectores

HÉLICE SIN DEFLECTORES						
Velocidad de rotación (Hz)	Po Guayaba	$Re_{sae}=Re_G$	Po Mango	$Re_{sae}=Re_M$	Po tomate	$Re_{sae}=Re_T$
5	10,05	15,98	26,25	9,30	8,68	17,56
10			7,74	19,00		
14			5,26	26,00		
17			4,55	30,31		
22			4,07	35,29		
24			3,98	36,58		
29			3,87	38,35		
42			3,82	39,23		

RUSHTON SIN DEFLECTORES						
Velocidad de rotación (Hz)	Po Guayaba	$Re_{sae}=Re_G$	Po Mango	$Re_{sae}=Re_M$	Po tomate	$Re_{sae}=Re_T$
5	8,79	18,91	27,06	12,36	10,16	17,89
10	3,38	30,37	7,02	20,68		
14	3,13	33,15	4,12	26,46		
17			3,36	30,53		
22			3,02	35,42		

TURBINA 2 SIN DEFLECTORES						
Velocidad de rotación (Hz)	Po Guayaba	$Re_{sae}=Re_G$	Po Mango	$Re_{sae}=Re_M$	Po tomate	$Re_{sae}=Re_T$
5	7,67	19,39	21,60	10,08	10,12	15,86
10			5,87	24,58		

TURBINA 4 INCLINADAS SIN DEFLECTORES						
Velocidad de rotación (Hz)	Po Guayaba	$Re_{sae}=Re_G$	Po Mango	$Re_{sae}=Re_M$	Po tomate	$Re_{sae}=Re_T$
5	8,04	28,66	39,31	14,41	7,32	30,06
10			10,02	25,81		
14			5,56	35,19		
17			4,25	44,15		

TURBINA 4 VERTICALES SIN DEFLECTORES						
Velocidad de rotación (Hz)	Po Guayaba	$Re_{sae}=Re_G$	Po Mango	$Re_{sae}=Re_M$	Po tomate	$Re_{sae}=Re_T$
5	8,92	25,70	34,34	13,32	9,44	24,68
10			8,69	26,09		
14			4,73	43,13		

Los resultados de k_s determinados por la ecuación 2.10, se presentan en la Tabla 3.15 y 3.16.

Como se puede observar, los valores de k_s varían para cada velocidad de rotación, en el caso de los valores de k_s del mango existe una desviación del 50 %. Esta variación se debe posiblemente a que el rango de estudio de la zona lineal comprende números de Reynolds mayores a 10, contrario a lo que se mencionan en bibliografía. En bibliografía también se reporta una variación de los valores de k_s del 25 al 30% (Chhabra y Richardson, 2008, p.392); Cavadas y Phino (2001) reportaron una variación del 30 al 40% en el resultado de k_s para un agitador hiperboloide siguiendo esta metodología (p.1)

Tabla 3.15. Valores de k_s obtenidos por el Método de Metzner y Otto, en pruebas con deflectores

PULPA DE FRUTA		guayaba		mango		Tomate	
HÉLICE CON DEFLECTORES							
Velocidad de rotación (Hz)	$Re_{sac}=Re_{guayaba}$	k_s	$Re_{sac}=Re_{mango}$	k_s	$Re_{sac}=Re_{tomate}$	k_s	
5	20,48	63,5	11,28	14,9	19,28	34,6	
10	41,68	32,4	27,25	9,3	49,55	24,0	
14	46,31	11,4	47,12	8,5	64,48	10,0	
17			67,81	8,5			
RUSHTON CON DEFLECTORES							
Velocidad de rotación (Hz)	$Re_{sac}=Re_{guayaba}$	k_s	$Re_{sac}=Re_{mango}$	k_s	$Re_{sac}=Re_{tomate}$	k_s	
5	22,18	69,8	15,47	21,5	21,15	39,1	
10			26,66	9,0	37,14	16,5	
14			33,53	5,7			
17			37,19	4,2			
22			39,42	2,6			
TURBINA 2 CON DEFLECTORES							
Velocidad de rotación (Hz)	$Re_{sac}=Re_{guayaba}$	k_s	$Re_{sac}=Re_{mango}$	k_s	$Re_{sac}=Re_{tomate}$	k_s	
5	21,05	65,6			17,72	31,0	
10							
TURBINA 4 INCLINADAS CON DEFLECTORES							
Velocidad de rotación (Hz)	$Re_{sac}=Re_{guayaba}$	k_s	$Re_{sac}=Re_{mango}$	k_s	$Re_{sac}=Re_{tomate}$	k_s	
5	21,78	68,3	16,01	22,4	20,05	36,4	
10			29,22	10,0			
TURBINA 4 VERTICALES CON DEFLECTORES							
Velocidad de rotación (Hz)	$Re_{sac}=Re_{guayaba}$	k_s	$Re_{sac}=Re_{mango}$	k_s	$Re_{sac}=Re_{tomate}$	k_s	
5	16,77	49,9	12,55	16,8	16,62	28,5	
10			46,66	17,3			

Tabla 3.16. Valores de k_s obtenidos por el Método de Metzner y Otto en pruebas sin deflectores

PULPA DE FRUTA		guayaba		mango		Tomate	
HÉLICE SIN DEFLECTORES							
Velocidad de rotación (Hz)	$Re_{sae}=Re_{guayaba}$	k_s	$Re_{sae}=Re_{mango}$	k_s	$Re_{sae}=Re_{tomate}$	k_s	
5	15,98	47,0	9,30	11,9	17,56	30,6	
10			19,00	6,1			
14			26,00	4,2			
17			30,31	3,3			
22			35,29	2,3			
24			36,58	2,0			
29			38,35	1,4			
42			39,23	0,6			
RUSHTON SIN DEFLECTORES							
Velocidad de rotación (Hz)	$Re_{sae}=Re_{guayaba}$	k_s	$Re_{sae}=Re_{mango}$	k_s	$Re_{sae}=Re_{tomate}$	k_s	
5	18,91	57,6	12,36	16,5	17,89	31,4	
10	30,37	22,1	20,68	6,7			
14	33,15	7,6	23,63	5,3			
17			26,46	4,3			
22			26,59	4,3			
TURBINA 2 SIN DEFLECTORES							
Velocidad de rotación (Hz)	$Re_{sae}=Re_{guayaba}$	k_s	$Re_{sae}=Re_{mango}$	k_s	$Re_{sae}=Re_{tomate}$	k_s	
5	19,39	59,4	10,08	13,0	15,86	26,8	
10			24,58	8,2			
TURBINA 4 INCLINADAS SIN DEFLECTORES							
Velocidad de rotación (Hz)	$Re_{sae}=Re_{guayaba}$	k_s	$Re_{sae}=Re_{mango}$	k_s	$Re_{sae}=Re_{tomate}$	k_s	
5	28,66	95,1	14,41	19,8	30,06	61,9	
10			25,81	8,7			
14			35,19	6,0			
17			44,15	5,2			
TURBINA 4 VERTICALES SIN DEFLECTORES							
Velocidad de rotación (Hz)	$Re_{sae}=Re_{guayaba}$	k_s	$Re_{sae}=Re_{mango}$	k_s	$Re_{sae}=Re_{tomate}$	k_s	
5	25,70	83,4	13,32	18,0	24,68	47,8	
10			26,09	8,8			
14			43,13	7,6			

Los valores de k_s medios que se obtuvieron por este método se muestran en la Tabla 3.17, los resultados de k_s de la guayaba son mayores que los valores de k_s de tomate de árbol y mango. Los valores teóricos de k_s en fluidos pseudoplásticos están en el orden 10 a 13. Estos resultados varían de acuerdo al tipo de fluido, generalmente en bibliografía estos resultados se obtuvieron con sustancias poliméricas (Chhabra y Richardson, 2008, p. 392; Jahangiri, 2008, pp. 387 y 388).

La constante k_s parece tener dependencia con las propiedades reológicas de las pulpas de fruta. A mayor índice de consistencia, mayor es el valor de la constante k_s , La pulpa de mango puede tener el menor valor de la constante k_s por ser más pseudoplástico.

Tabla 3.17. Valores de k_s medios obtenidos por el Método de Metzner y Otto en guayaba, mango y tomate de árbol

AGITADOR	Guayaba n=0,169	Mango n=0,141	Tomate n= 0,237
CON DEFLECTORES			
Hélice	35,8 ±26,2	10,3±3,1	22,9±12,4
Rushton	69,8	8,6±7,6	27,8±16,0
Turbina 2	65,6		31,0
Turbina 4 inclinadas	68,3	16,2±8,7	36,4
Turbina 4 verticales	49,9	17,1±0,4	28,5
Fluidos pseudoplásticos n<1			
Turbina 6 aspas planas *		11,5	
Turbina 6 aspas inclinadas *		13,0	
Hélice *		10,0	
SIN DEFLECTORES			
Hélice	47,0±25,7	4,0±3,6	30,6
Rushton	29,1±25,7	7,4±5,2	25,6
Turbina 2	59,4	10,6±3,4	26,8
Turbina 4 inclinadas	95,1	9,9±6,7	61,9
Turbina 4 verticales	83,4	11,5±5,7	47,8
Fluidos pseudoplásticos n<1			
Turbina 6 aspas planas *		11,5	
Turbina 6 aspas inclinadas *		13,0	
Hélice *		10,0	

*(Chhabra y Richardson, 2008)

Estos resultados no son confiables por el escaso número de valores determinados dentro del régimen laminar. No se pudo obtener más datos porque no fue factible medir las fuerzas de agitación a velocidades de rotación menores a 5Hz.

3.5.2 OBTENCIÓN DE k_s POR EL MÉTODO DE LA PENDIENTE

Los valores de $Kp = P_o * Re$ del aceite SAE20W50 se muestran en la Tabla 3.18, estos resultados se calcularon en los puntos de la zona lineal determinada en el acápite 3.4.

Tabla 3.18. Valores de Kp del SA20W50

Con deflectores					
Nº Puntos	Hélice	Rushton	Turbina 2 verticales	Turbina 4 inclinadas	Turbina 4 verticales
1	344	349	274	232	149
2	195	186	166	133	126
3	163	160	160	139	
4	157	173	165		
5	159		187		
6	167				
7	175				
Kp medio	194	217	190	168	138
Sin deflectores					
Nº Puntos	Hélice	Rushton	Turbina 2 verticales	Turbina 4 inclinadas	Turbina 4 verticales
1	278	175	257	309	264
2	158	101	164	162	155
3	147	125	173	140	151
4	152		184	141	171
Kp medio	183	134	194	188	185
Kp bibliografico	35-50	75			

De igual manera se determinó la zona de lineal de las curvas de potencia en escala logarítmica de las pulpas de fruta (P_o vs Re_m), se obtuvieron los valores logarítmicos del número de potencia y del número de Reynolds modificado, estos valores se ajustaron a la ecuación lineal $\log P_o = x \log Re_m$. Se utilizaron los valores correspondientes a un coeficiente R^2 mayor a 0,96. No se pudo determinar la zona lineal de las curvas de potencia de agitación de las pulpas de guayaba y tomate de árbol, porque solo dos puntos correspondieron a la zona lineal.

La Figura 3.25 representa una curva de potencia de agitación con el número de Reynolds modificado, una vez determinada la zona lineal se calculó la constante $Kp_n = P_o * Re_m$.

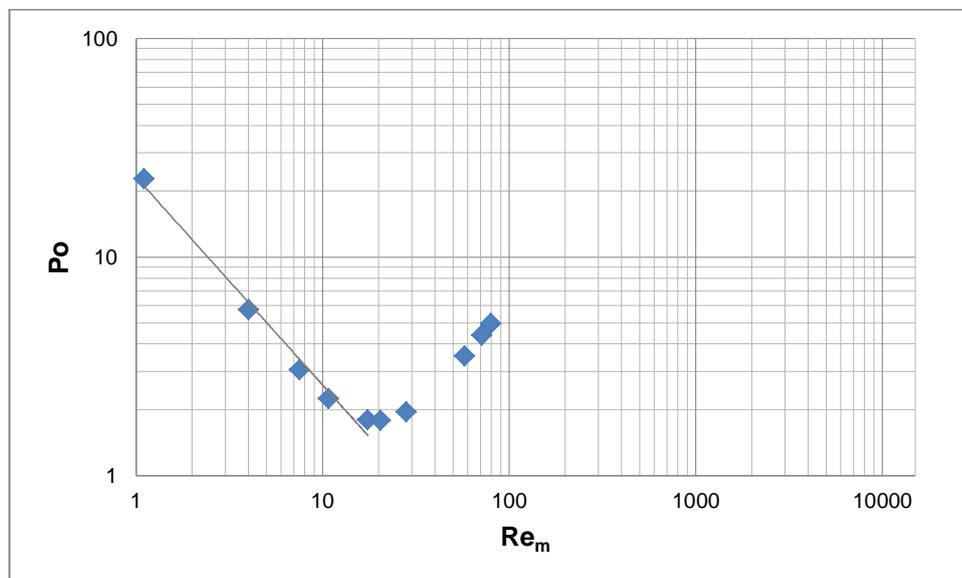


Figura 3.25. Número de potencia en función del número de Reynolds modificado, hélice con deflectores.

Los valores de $Kp_{(n)}$ de la pulpa de mango para los agitadores rushton, hélice, turbina de 2 aspas verticales y turbina de 4 aspas inclinadas y verticales se muestran en la Tabla 3.19

Tabla 3.19. Valores de $Kp_{(n)}$ de mango

Con deflectores					
Nº Puntos	Hélice	Rushton		Turbina 4 inclinadas	Turbina 4 verticales
1	25,3	21,6		18,2	16,8
2	23,1	23,0		18,1	20,0
3	23,0	30,3		22,5	28,9
4	24,4	39,3			
5	31,4				
$Kp_{(n)}$ medio	25,4	28,5		19,6	18,4
Sin deflectores					
Nº Puntos	Hélice	Rushton	Turbina 2 verticales	Turbina 4 inclinadas	Turbina 4 verticales
1	29,1	30,0	24,0	43,6	38,1
2	31,2	28,3	23,6	40,4	35,0
3	39,6	31,0	28,7	41,8	35,6
4	49,2	36,3		45,8	38,6
5				59,4	50,1
6				67,6	
$Kp_{(n)}$ medio	37,3	31,4	25,5	49,7	39,5

Los resultados de $k_{s(n)}$ para la pulpa de mango por la metodología de la pendiente se muestran en la Tabla 3.20.

Tabla 3.20. Valores de $k_{s(n)}$ de mango por la metodología de la pendiente

Con deflectores	
Hélice	10,6±2,6
Rushton	10,6±1,5
turbina 4 inclinadas	12,2±2,9
turbina 4 verticales	8,5±1,9
Sin deflectores	
Hélice	6,4±1,1
Rushton	5,4±1,5
turbina 2 verticales	9,5±1,3
turbina 4 inclinadas	4,7±1,1
turbina 4 verticales	6,0±1,7

Estos resultados de $k_{s(n)}$ son similares a los resultados que se obtuvieron con el método de Metzner y Otto debido a que parten del mismo principio. Este método es más preciso porque considera la zona lineal del fluido no newtoniano.

3.5.3 RELACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN POR LA METODOLOGÍA DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD

La velocidad de deformación aproximada en un recipiente de agitación en función de la velocidad de rotación se determinó por la ecuación 2.13.

Para el sistema de agitación de este estudio, la relación de la velocidad de deformación y la velocidad de rotación se expresa en la ecuación 3.2.

$$\gamma = 3,1 * f * N \quad [3.2]$$

Se empleó un factor (f) de 3,5, para que la constante de proporcionalidad de la velocidad de deformación con la velocidad de rotación sea igual a 11, comparable con bibliografía.

3.6 CURVAS DE POTENCIA DE AGITACIÓN DE LAS PULPAS DE FRUTA DE MANGO, GUAYABA Y TOMATE DE ÁRBOL

3.6.1 CURVAS DE POTENCIA DE AGITACIÓN POR LA METODOLOGÍA DE METZNER Y OTTO

3.6.1.1 Efecto del tipo de fluido en el número de potencia de agitación

Con deflectores

Los números de Reynolds se determinaron con los valores de k_s medios de la Tabla 3.17.

Las curvas de potencia de agitación por la metodología de Metzner y Otto con deflectores se muestran en las Figuras 3.26, 3.27, 3.28, 3.29 y 3.30, en general las curvas de potencia de agitación de las pulpas de mango, guayaba, tomate y SAE20W50 se encuentran agrupadas. Se observa que la curva de potencia de agitación del aceite SAE20W50 coincide con las curvas de las pulpas de fruta en ciertas zonas, en estos casos sería posible determinar el número de potencia empleando únicamente la curva del fluido newtoniano; en las zonas donde existen desviaciones se debería emplear la curva propia de la pulpa de fruta.

Los valores de los números de Reynolds que se alcanzan son diferentes en las pulpas de guayaba, tomate y mango, esta variación se debe a los diferentes valores de k_s que se determinaron para cada pulpa de fruta. Los números de Reynolds que se alcanzaron en las curvas de potencia de agitación están en el orden de 10 a 1 000 aproximadamente para las pulpas de fruta y de 10 a 100 para el aceite SAE20W50.

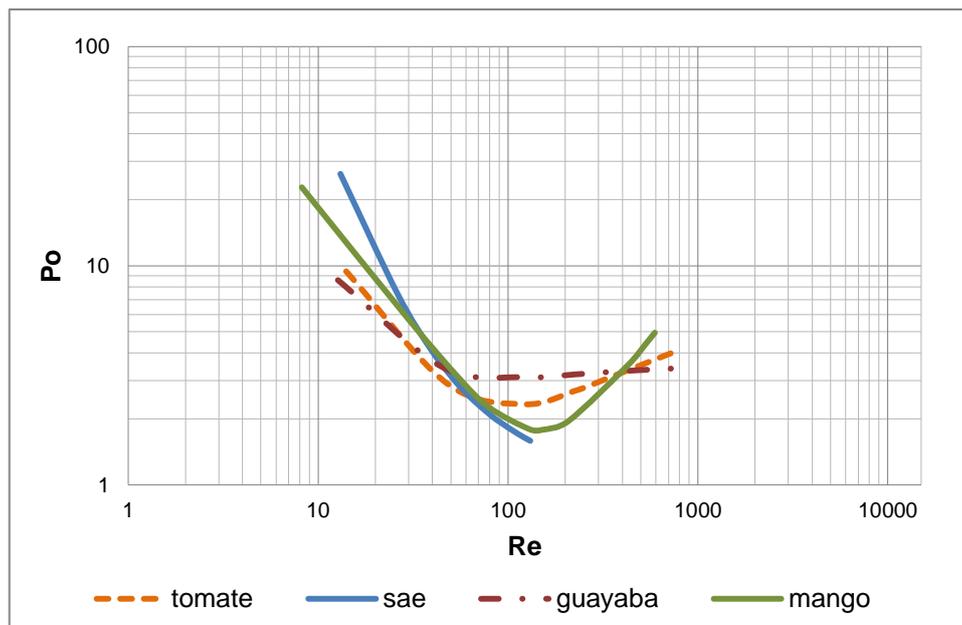


Figura 3.26. Curva de potencia de agitación de hélice con deflectores, Metzner y Otto

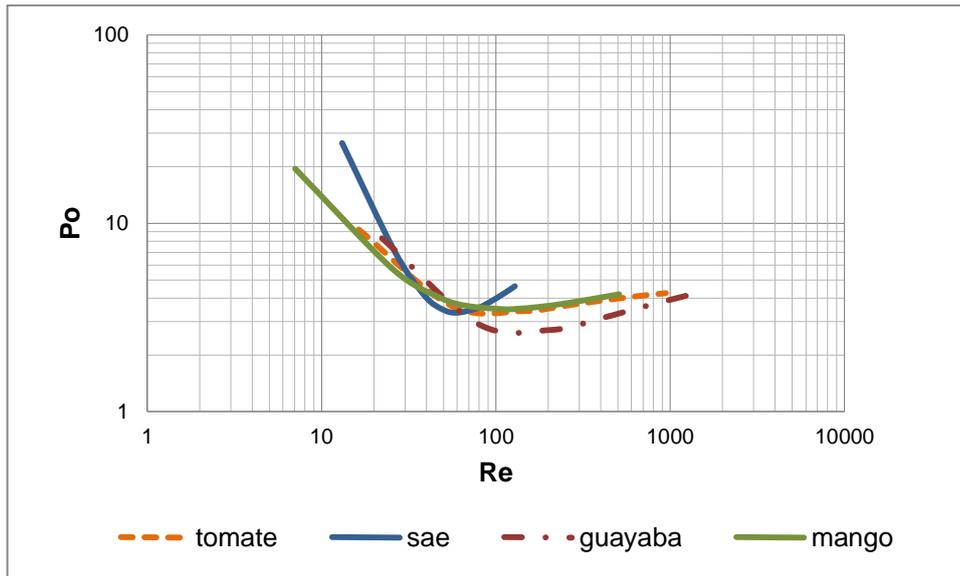


Figura 3.27. Curva de potencia de agitación de rushton con deflectores, Metzner y Otto

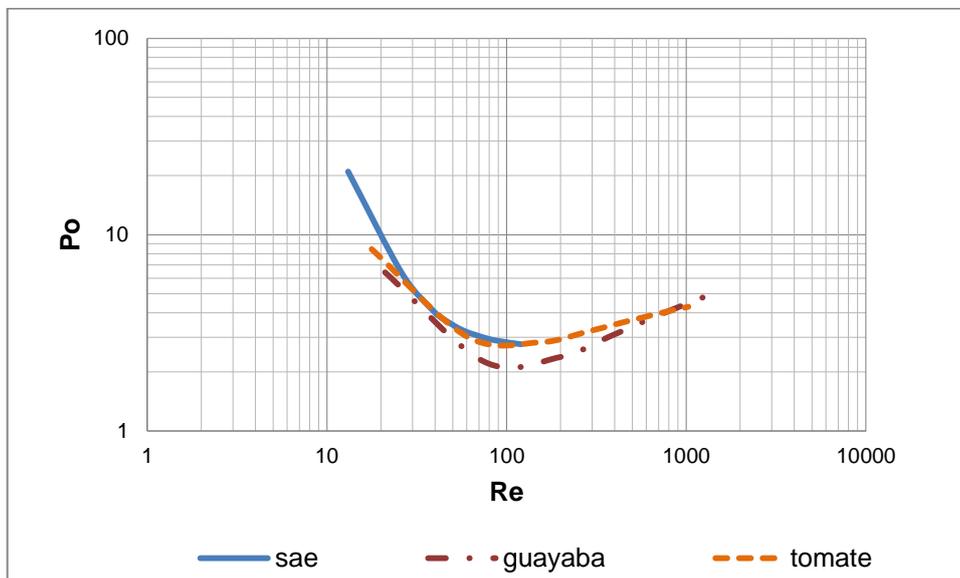


Figura 3.28. Curva de potencia de agitación de turbina 2 aspas verticales con deflectores, Metzner y Otto

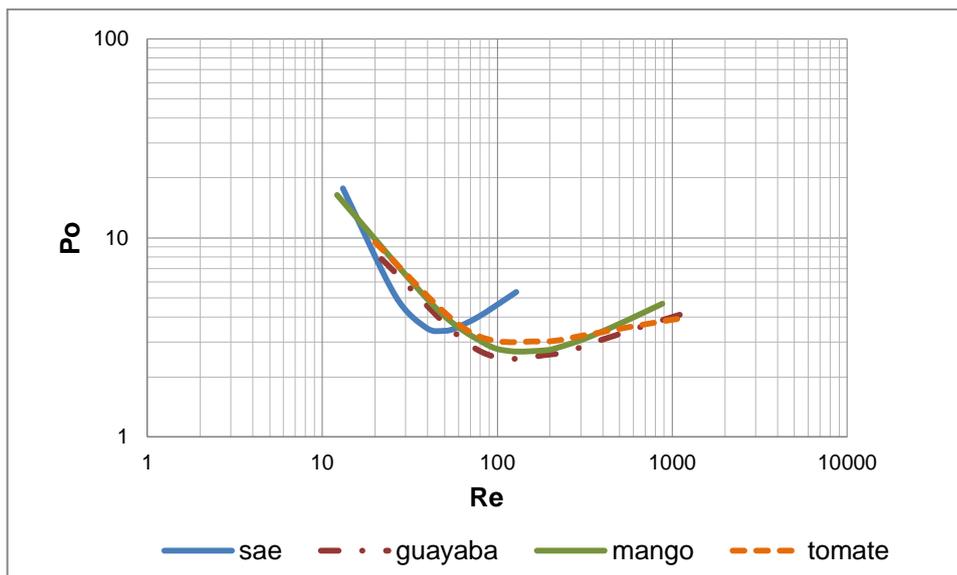


Figura 3.29. Curva de potencia de agitación de turbina 4 aspas inclinadas con deflectores, Metzner y Otto

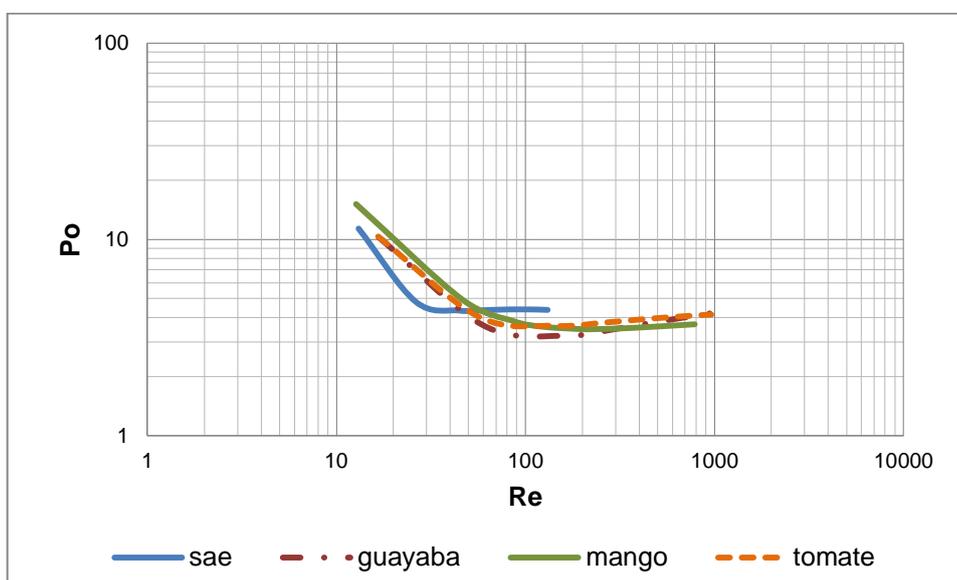


Figura 3.30. Curva de potencia de agitación de turbina 4 aspas verticales con deflectores, Metzner y Otto

El análisis estadístico de las curvas de potencia de agitación obtenidas por el método de Metzner y Otto en números de Reynolds de 35, 60 y 100 se presenta en la Tabla 3.21. Este análisis muestra que no existe diferencia significativa entre las pulpas de fruta y el aceite SAE, a excepción de la curva obtenida para el agitador tipo turbina de 4 aspas verticales e inclinadas. Para un número de

Reynolds de 35 se observa una diferencia estadísticamente significativa con respecto a los números de potencia de agitación de los otros fluidos.

Tabla 3.21. Valor estadístico p, efecto del tipo de fluido para los diferentes agitadores con deflectores. Curvas Metzner y Otto

Agitador	Re		
	35	60	100
Hélice	0,270	0,206	0,029
Turbina rushton	0,263	0,248	0,196
Turbina 2 aspas verticales	0,926	0,761	0,635
Turbina 4 aspas inclinadas	0,041	0,472	0,066
Turbina 4 aspas verticales	0,039	0,323	0,321

Sin deflectores

Las curvas de potencia de agitación realizadas sin deflectores se presentan con el número de potencia y el número de Froude en función del número de Reynolds en las Figuras 3.31-3.35. En estos resultados no se encuentra influencia del número de Froude debido a que los valores de $1/Fr^{\nu}$ calculados para los diferentes números de Reynolds comprendieron valores entre 0,93 y 1,15, como se mencionó en la curvas de potencia de agitación sin deflectores del aceite SAE20W50 el régimen donde ocurre la agitación determina la influencia del número de Froude, en bibliografía se tiene que el número de potencia de agitación depende del número de Froude para números de Reynolds mayores a 300; a pesar de que el rango de estudio en las pulpas de fruta llega hasta números de Reynolds de 1000, no se observó formación de vórtices durante la agitación.

Por esta razón en adelante no se consideró el número de Froude en las curvas de potencia de agitación sin deflectores.

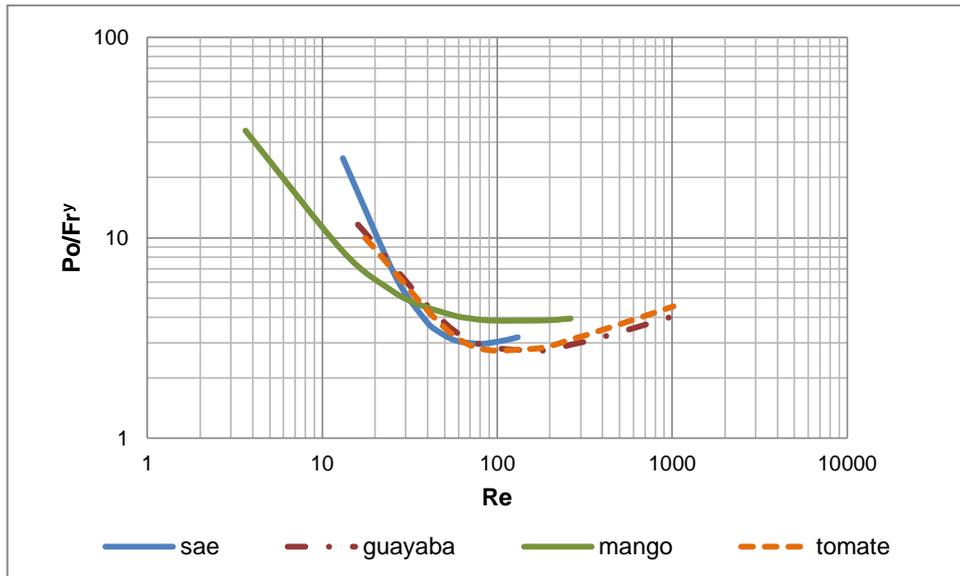


Figura 3.31. Curva de potencia de agitación de hélice sin deflectores, Metzner y Otto

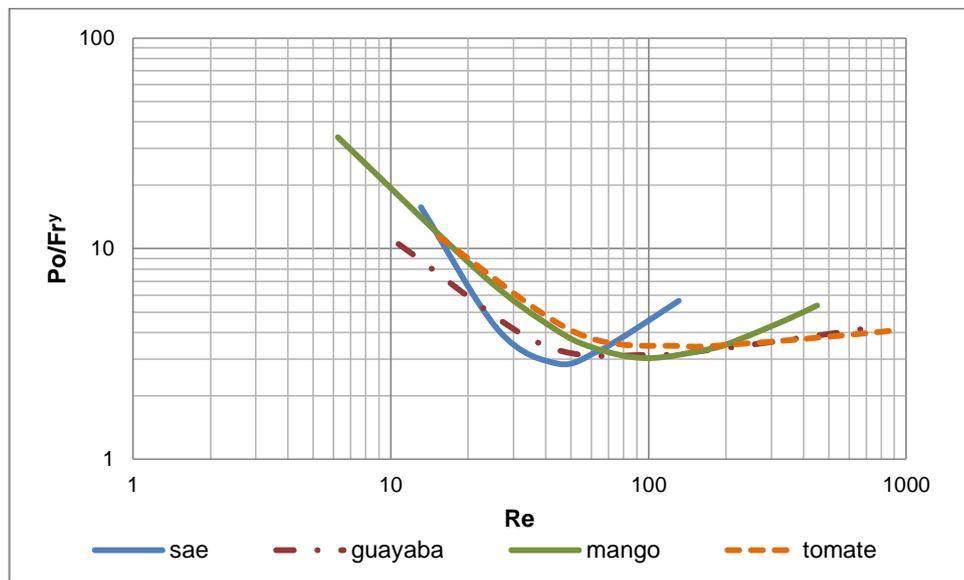


Figura 3.32. Curva de potencia de agitación de rushton sin deflectores, Metzner y Otto

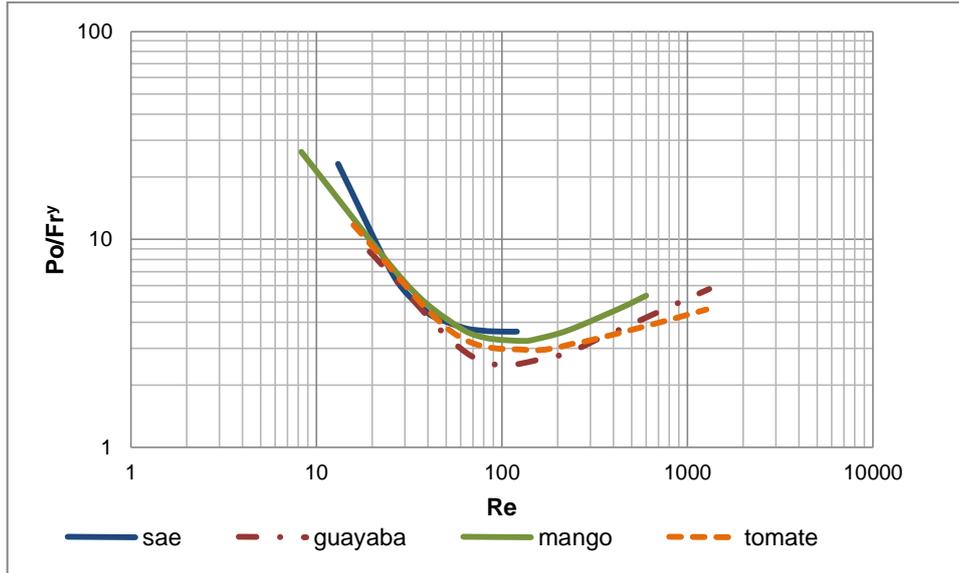


Figura 3.33. Curva de potencia de agitación de turbina 2 aspas verticales sin deflectores, Metzner y Otto

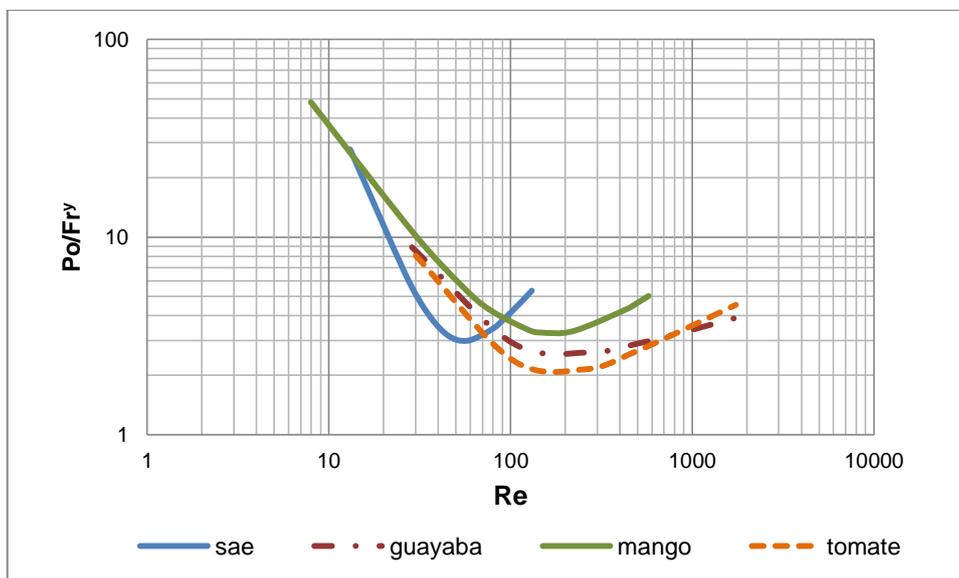


Figura 3.34. Curva de potencia de agitación de turbina 4 aspas inclinadas sin deflectores, Metzner y Otto

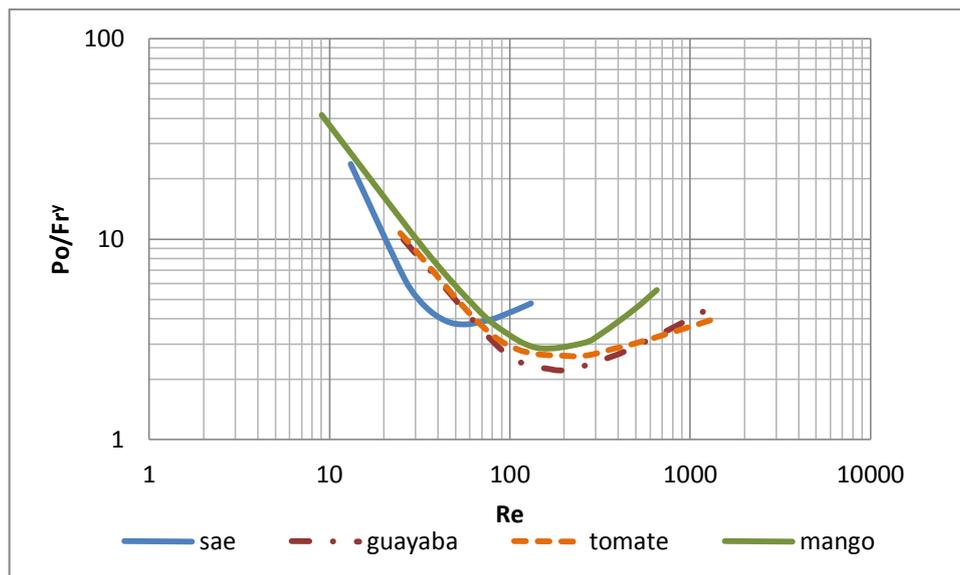


Figura 3.35. Curva de potencia de agitación de turbina 4 aspas verticales sin deflectores, Metzner y Otto

El análisis estadístico para las curvas de potencia de agitación sin deflectores se expone en la Tabla 3.22, existe una diferencia significativa en el número de potencia entre el SAE y las pulpas de fruta en las pruebas realizadas con agitadores de turbina de 4 aspas verticales e inclinadas, pero entre las pulpas de fruta el número de potencia es similar.

Tabla 3.22. Valor estadístico p, efecto del tipo de fluido para los diferentes agitadores sin deflectores. Curvas Metzner y Otto

Agitador	Re		
	35	60	100
Hélice	0,416	0,150	0,142
Turbina rushton	0,076	0,329	0,336
Turbina 2 aspas verticales	0,411	0,422	0,385
Turbina 4 aspas inclinadas	0,019	0,036	0,109
Turbina 4 aspas verticales	0,009	0,004	0,003

En general, las curvas de potencia de agitación de las pulpas de fruta parecen coincidir con la curva de potencia de agitación del aceite SAE. En el caso de los agitadores tipo hélice, rushton, turbina de 2 aspas verticales los números de potencia son estadísticamente semejantes en números de Reynolds de 35, 60 y

100, pero en adelante la curva del fluido newtoniano cambia de sentido. Esto se debe a que el patrón de flujo del aceite SAE difiere del patrón de flujo de las pulpas de fruta, en la práctica se observó que a mayores velocidades de rotación, se observó un mayor movimiento en el aceite SAE.

Cavadas y Pinho (2001), realizaron pruebas con soluciones poliméricas (fluidos no newtonianos) siguiendo la metodología de Metzner y Otto, con un valor de k_s igual a 12, los autores encontraron que existe un incremento en el número de potencia de agitación con respecto al del fluido newtoniano aproximadamente en un 20%. Esto se debe a que la evaluación del número de potencia se la realiza en el régimen transitorio, como se observa en la Figura 3.36. En las curvas de pulpa de fruta obtenidas por esta metodología se observa una desviación del fluido newtoniano con respecto a las pulpas de fruta en números de Reynolds mayores a 100.

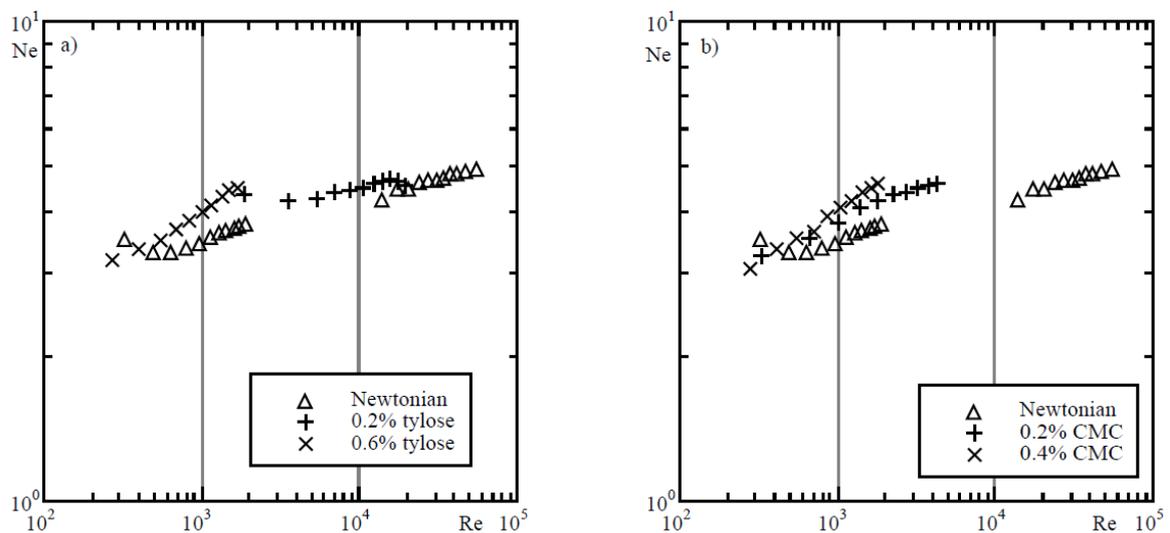


Figura 3.36. Curvas de potencia de agitación turbina rushton sin deflectores en soluciones poliméricas, Tilosa y CMC carbometilcelulosa (Cavadas y Pinho, 2001)

Otras fuentes bibliográficas mencionan que los fluidos no newtonianos coinciden con las curvas de potencia de agitación de los fluidos newtonianos únicamente en números de Reynolds menores a 10 y mayores a 100 (McCabe y Smith, p.266, 1998)

3.6.1.2 Efecto del tipo de agitador en el número de potencia de agitación

Se realizó un análisis estadístico en las curvas de potencia de agitación en cada pulpa de fruta para cada uno de los agitadores. En la Tabla 3.23 se presenta el valor estadístico p del efecto del tipo de agitador. Se observa que existe una diferencia significativa en el número de potencia de agitación a un número de Reynolds de 35, pero en números de Reynolds de 60 y 100 no se encuentra una diferencia estadísticamente significativa. Estos resultados se deben a que en números de Reynolds bajos predominan las fuerzas inerciales, es decir que la viscosidad aparente de las pulpas de fruta es más alta.

En las curvas de potencia de agitación de la Figuras 3.37-3.42, de las pulpas de fruta con y sin deflectores se observa que los agitadores tipo turbina de 4 aspas inclinadas y verticales tienen números de potencia más altos que los agitadores tipo hélice y turbina de 2 aspas verticales.

Tabla 3.23. Valor estadístico p, efecto del tipo de agitador. Curvas Metzner y Otto

Pulpa	Deflectores	Re		
		35	60	100
Guayaba	Con	0,092	0,132	0,077
	Sin	0,027	0,231	0,540
Mango	Con	0,439	0,206	0,074
	Sin	0,024	0,172	0,652
Tomate	Con	0,047	0,032	0,027
	Sin	0,036	0,276	0,115

Con deflectores

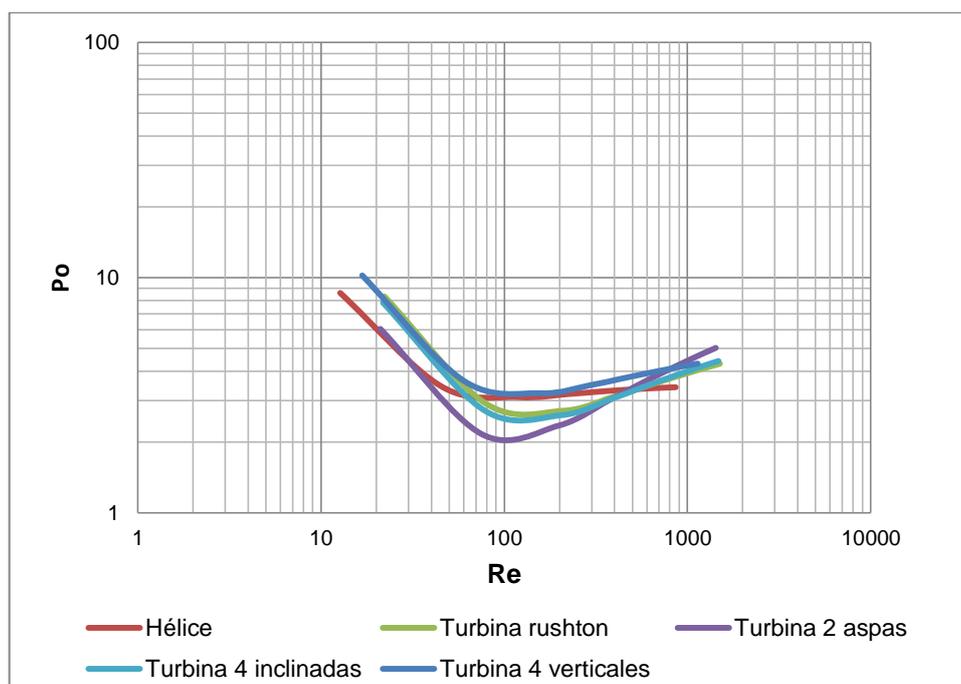


Figura 3.37. Curva de potencia de agitación guayaba con deflectores, Metzner y Otto

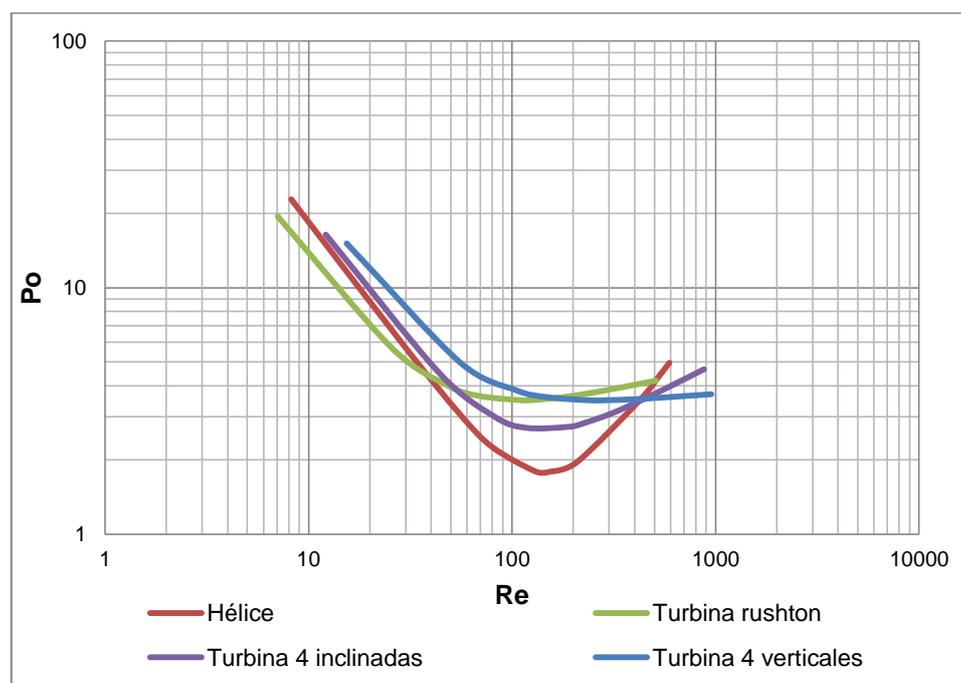


Figura 3.38. Curva de potencia de agitación mango con deflectores, Metzner y Otto

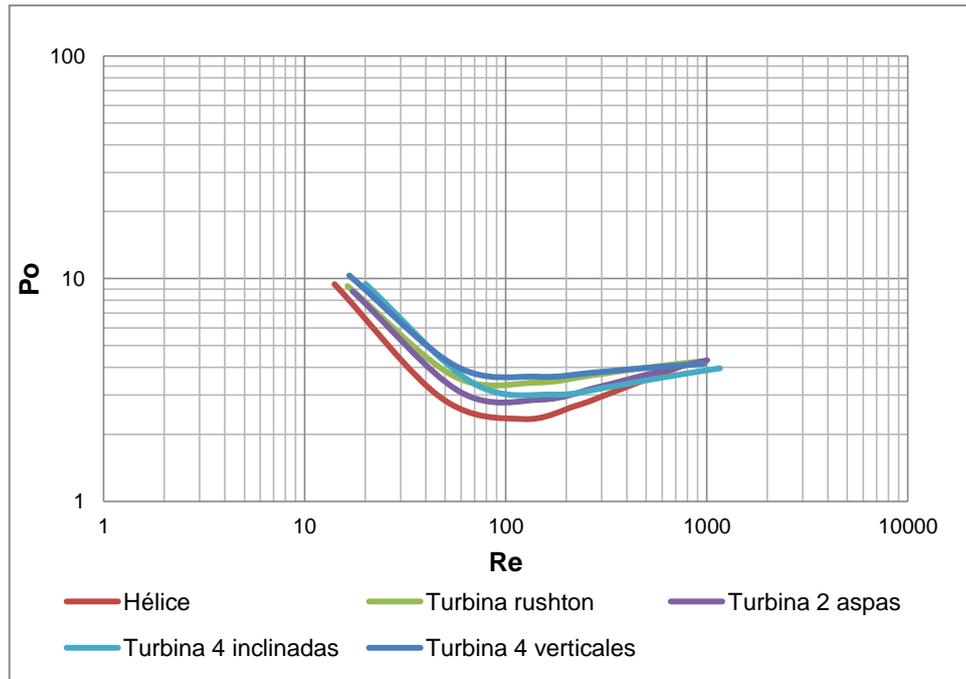


Figura 3.39. Curva de potencia de agitación tomate con deflectores, Metzner y Otto

Sin deflectores

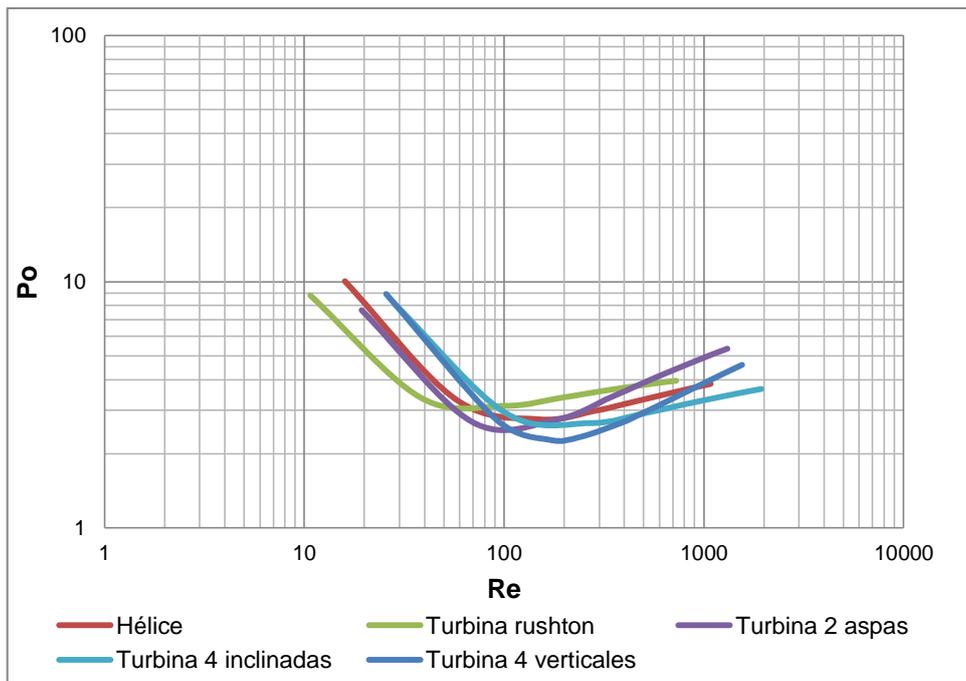


Figura 3.40. Curva de potencia de agitación guayaba sin deflectores, Metzner y Otto

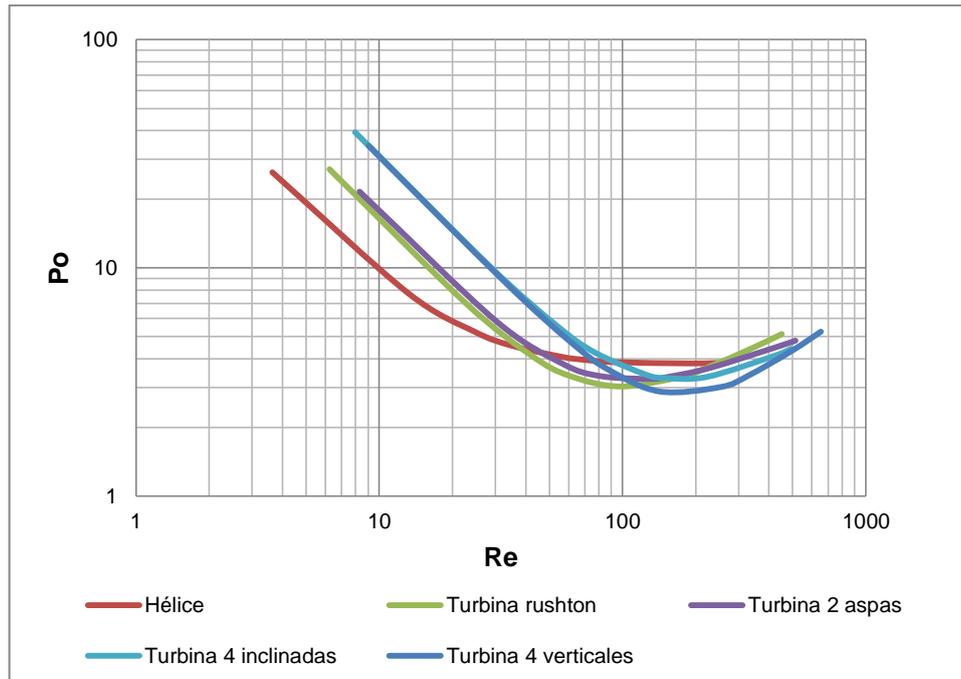


Figura 3.41. Curva de potencia de agitación mango sin deflectores, Metzner y Otto

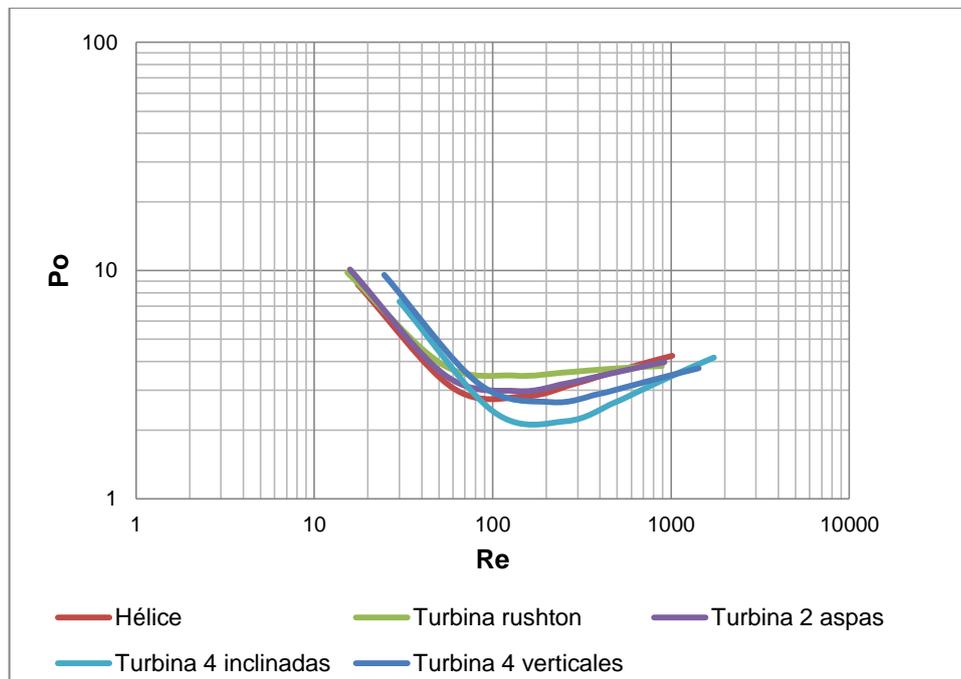


Figura 3.42. Curva de potencia de agitación tomate sin deflectores, Metzner y Otto

Adamiak y Karckz (2007), investigaron el efecto del tipo de agitador en la agitación de agua con diferentes soluciones de glucosa empleando agitadores tipo rushton de 6 aspas, turbina de 6 aspas inclinadas y hélice de 1 paso en

régimen transitorio-turbulento y obtuvieron que la turbina rushton tiene un número de potencia mayor a la turbina de 6 aspas y esta a su vez tiene un número de potencia mayor que el agitador tipo hélice (pp. 17 y 18).

En los resultados de las curvas de potencia de agitación se observa que la turbina rushton está por debajo de los otros agitadores en las pruebas con pulpas de mango con deflectores y de guayaba sin deflectores esto se debe a la dispersión de los datos de fuerza entre las repeticiones.

3.6.1.3 Efecto del uso de deflectores en el número de potencia de agitación

El uso de deflectores no influye estadísticamente en el número de potencia de agitación, los resultados del análisis de varianza de la pulpa de guayaba se presentan en la Tabla 3.24. Esto se debe a que la agitación no se realizó en el régimen turbulento. Las pulpas de mango y tomate presentan resultados semejantes.

Tabla 3.24. Valor estadístico p, efecto del uso de deflectores en pulpa de guayaba. Curvas Metzner y Otto

Guayaba	Re		
Agitador	35	60	100
Hélice	0,187	0,940	0,452
Turbina rushton	0,082	0,588	0,387
Turbina 2 aspas	0,483	0,367	0,293
Turbina 4 aspas inclinadas	0,211	0,277	0,449
Turbina 4 aspas verticales	0,136	0,779	0,149

3.6.2 CURVAS DE POTENCIA DE AGITACIÓN POR LA METODOLOGÍA DE LA PENDIENTE

Las curvas de potencia de agitación en función del número de Reynolds modificado para el agitador tipo turbina de 4 aspas verticales se presentan en la Figura 3.43 , se observa que existe diferencia en los números de potencia de

agitación entre las pulpas de fruta y el aceite SAE. Las pulpas de fruta se encuentran por debajo del fluido newtoniano, por lo que parecería existir una dependencia con el índice de comportamiento reológico, fluidos con índice de comportamiento reológico n menor a 1 se encontrarían debajo de los fluidos con índice de comportamiento reológico n igual a 1. A pesar de esta observación, no se puede establecer una relación creciente o decreciente entre los números de potencia de las pulpas de fruta, puesto que la pulpa de mango tiene el menor índice de comportamiento reológico y presenta números de potencia más altos que la pulpa de guayaba y tomate.

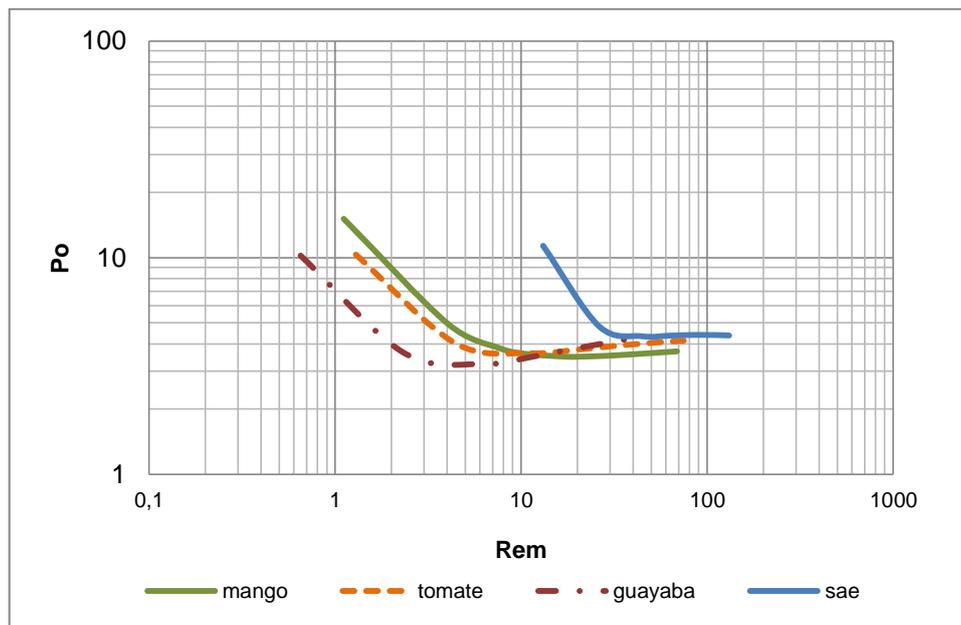


Figura 3.43. Curva de potencia de agitación Po vs Re_m , turbina 4 aspas verticales con deflectores

Otras pruebas experimentales en bibliografía realizadas en fluidos pseudoplásticos poliméricos de la Figura 3.44, realizadas con 3 agitadores de turbina de 4 aspas planas en el mismo eje, determinaron que el número de potencia decrece con el índice de comportamiento reológico, las propiedades reológicas de estos fluidos se presentan en la Tabla 3.25 (Thakur *et al*, 2004, p.1217). Al comparar los resultados experimentales con estos resultados bibliográficos se confirma que los fluidos pseudoplásticos presentan menores números de potencia que los fluidos newtonianos, pero no existe una relación

decreciente entre las pulpas de fruta debido a la variedad de sus propiedades fisicoquímicas.

Tabla 3.25. Propiedades reológicas de fluidos pseudoplásticos poliméricos

Fluido	K(Pa.s)	n
GUA, goma guar	124	0,12
PAA, poliacrilamida	52,7	0,4
E1, emulsión	110	0,26
E2, emulsión	130	0,27
GLY, glicerina	0,78	1

(Thakur *et al.*, 2004, p. 1213)

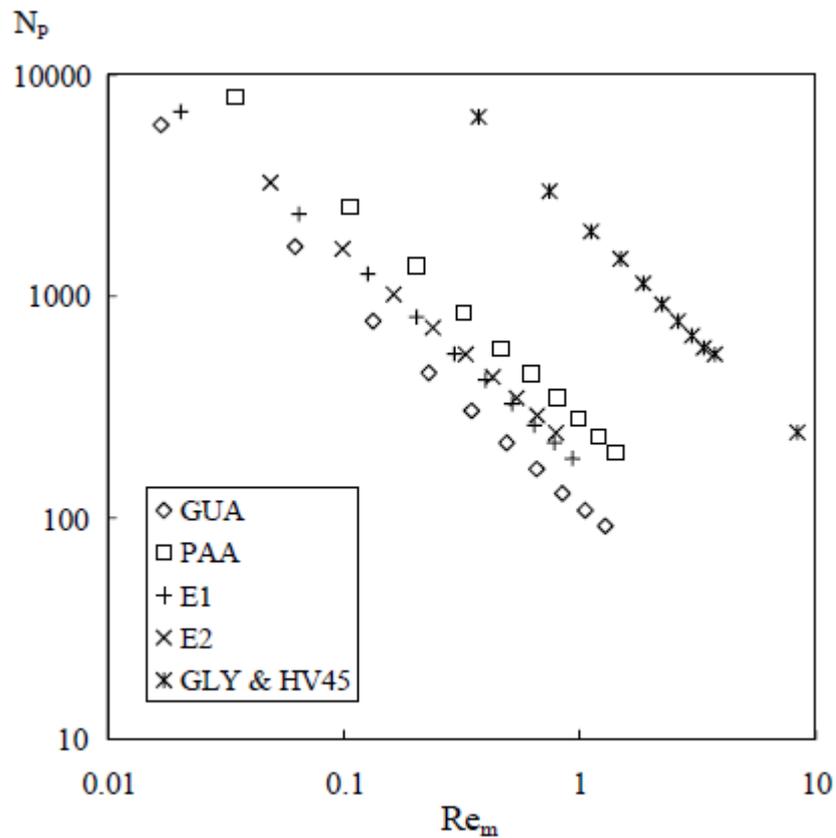


Figura 3.44. Número de potencia de fluidos pseudoplásticos para 3 agitadores turbina de 4 aspas planas a una distancia de 0,065 m de separación, en emulsiones alimenticias E_1 y E_2 , poliacrilamida PAA, glicerina GLY y goma guar GUA

(Thakur *et al.*, 2004, p. 1217)

Por otro lado se observa que la pulpa de mango tiene una zona lineal mayor que las pulpas de guayaba y tomate de árbol, al determinar los puntos correspondientes a la zona lineal de las curvas de potencia de agitación en función del Reynolds modificado, por la metodología de la pendiente de acápite 3.5.2, se determinó que fue factible obtener las curvas de potencia de agitación solo para la pulpa de mango.

Las curvas de potencia de agitación de la pulpa de mango por la metodología de la pendiente para los diferentes agitadores con y sin deflectores se presentan en la Figura 3.45 y Figura 3.46.

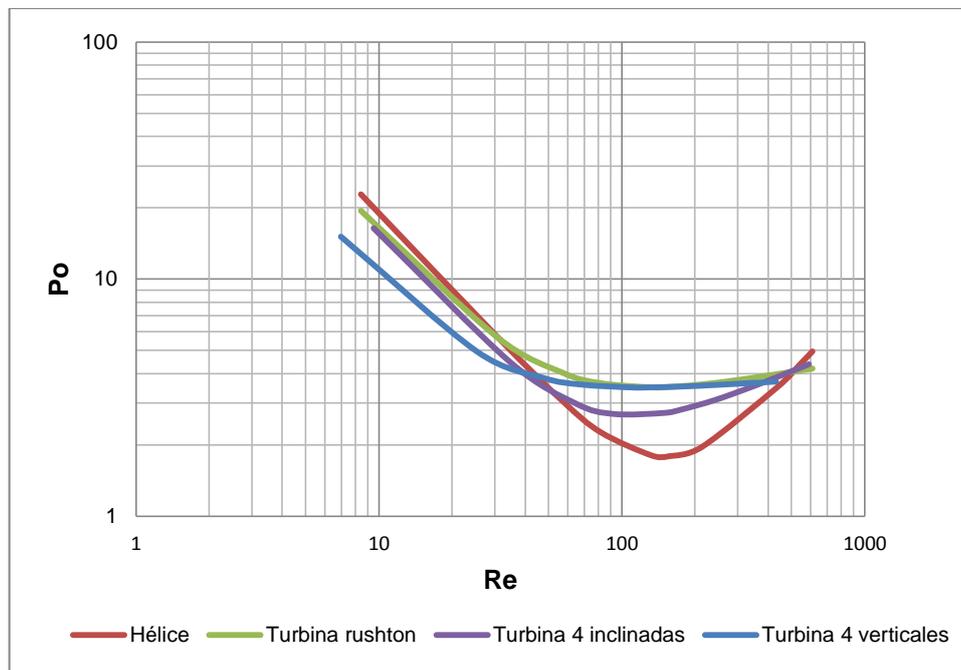


Figura 3.45. Curva de potencia de agitación mango con deflectores, Pendiente

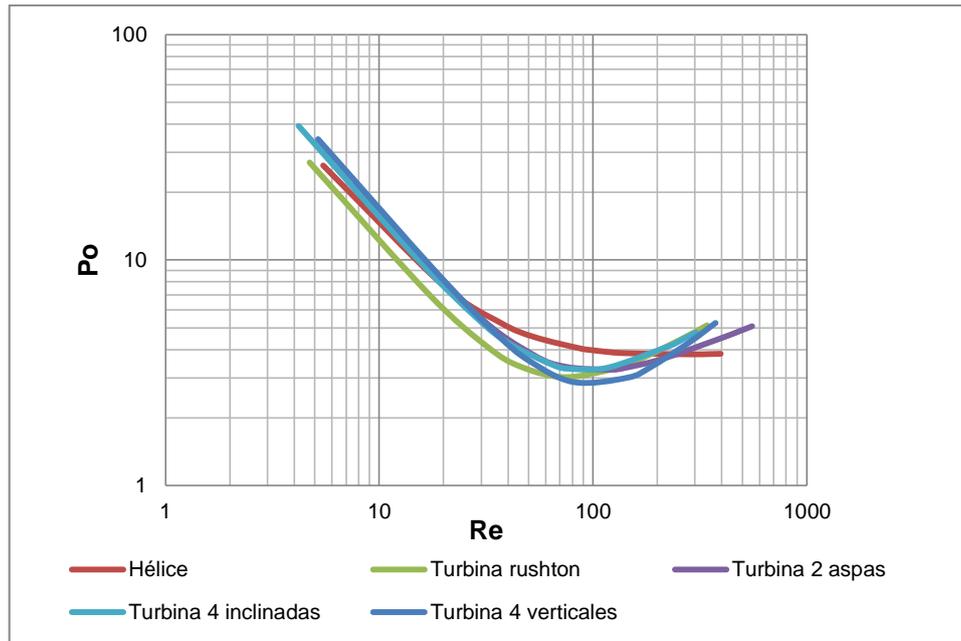


Figura 3.46. Curva de potencia de agitación mango sin deflectores, Pendiente

Las tendencias de las curvas por esta metodología son similares a las obtenidas por la metodología de Metzner y Otto, ya que los valores de k_s son similares, pero con una menor desviación estándar.

3.6.3 CURVAS DE POTENCIA DE AGITACIÓN POR LA MÉTODOLÓGÍA DEL GRADIENTE DE VELOCIDAD

3.6.3.1 Efecto del tipo de fluido en el número de potencia de agitación

Con deflectores

Las curvas potencia de agitación de las pulpas de fruta de mango, guayaba y tomate para los diferentes tipos de agitadores se presentan con números de Reynolds obtenidos por la metodología del gradiente de velocidad. En las Figuras 3.47 y 3.48 de pruebas realizadas con deflectores se observa una curva para cada pulpa de fruta.

Estos gráficos tienen una tendencia lineal hasta números de Reynolds menores a 20-30, pero a mayores números de Re se observa un cambio de sentido.

Los valores del análisis de varianza de los números de potencia a valores de números de Reynolds de 35, 60 y 100, con deflectores se resumen en la Tabla 3.26 y se determinó que existe una diferencia estadísticamente significativa de los números de potencia de la pulpa de mango con las pulpas de guayaba y tomate de árbol a un número de Reynolds igual a 35, para números de Reynolds de 60 y 100 no se encontraron diferencias estadísticas.

Tabla 3.26. Valor estadístico p, efecto tipo de fluido pruebas con deflectores. Curvas gradiente de velocidad

Agitador	Valor estadístico p		
	35	60	100
Hélice	0,025	0,149	0,024
Turbina rushton	0,011	0,082	0,799
Turbina 2 aspas verticales	0,244	0,986	0,591
Turbina 4aspas inclinadas	0,054	0,752	0,107
Turbina 4 aspas verticales	0,051	0,420	0,744

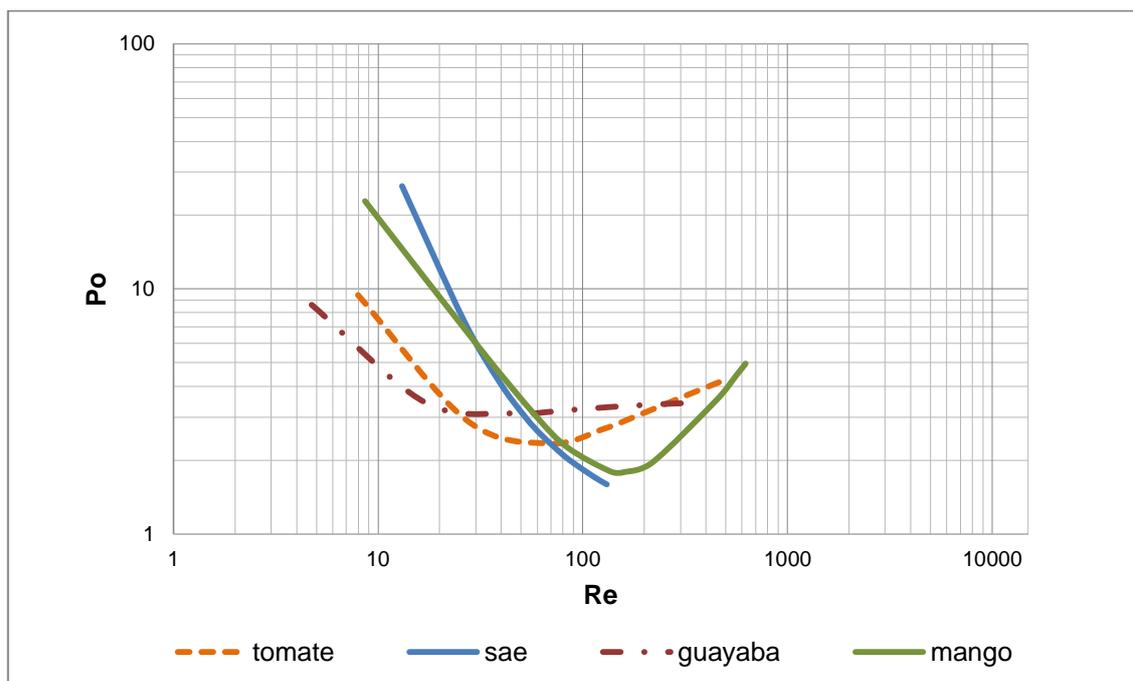


Figura 3.47. Curva de potencia de agitación de hélice con deflectores, gradiente de velocidad

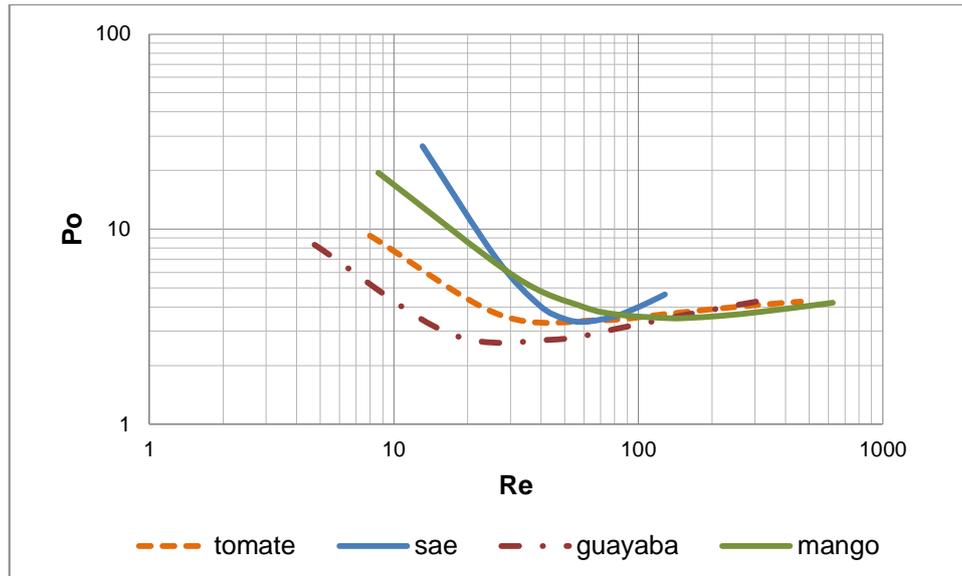


Figura 3.48. Curva de potencia de agitación de rushton con deflectores, gradiente de velocidad

Sin deflectores

Las curvas potencia de agitación de las pulpas de fruta de mango, guayaba y tomate sin deflectores tiene similitud con las curvas obtenidas de la agitación con deflectores, como se observa en la Figuras 3.49 y 3.50. Esto se debe a que los números de Reynolds en los que se dio la agitación no están en régimen turbulento $Re > 10\ 000$ donde es necesario el uso de estos accesorios (Aguado, 1999).

En estas curvas de potencia sin deflectores también obtuvo una diferencia estadísticamente significativa de los números de potencia entre las pulpas de guayaba y tomate de árbol con la pulpa de mango a un valor de Reynolds igual a 35 y 60, pero en números de Reynolds de 100 no se presenta diferencia entre los números de potencia. El resumen del valor estadístico p se presenta en la Tabla 3.27.

Tabla 3.27. Valor estadístico p, efecto del tipo de fluido pruebas sin deflectores. Curvas gradiente de velocidad

Agitador	Valor estadístico p		
	Re		
	35	60	100
Hélice	0,009	0,022	0,085
Turbina rushton	0,031	0,272	0,535
Turbina 2 aspas verticales	0,035	0,363	0,647
Turbina 4 aspas inclinadas	0,001	0,005	0,095
Turbina 4 aspas verticales	0,004	0,028	0,231

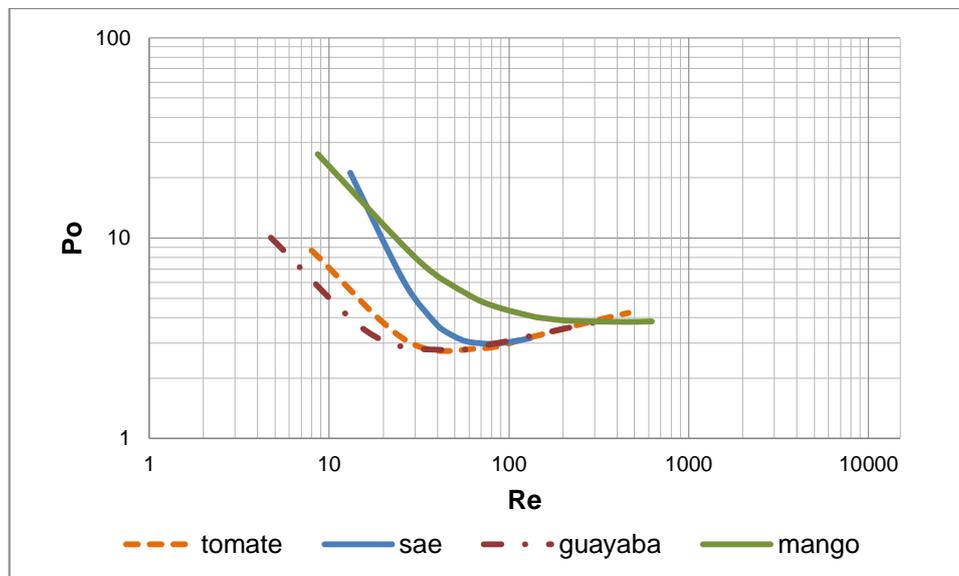


Figura 3.49. Curva de potencia de agitación de hélice sin deflectores

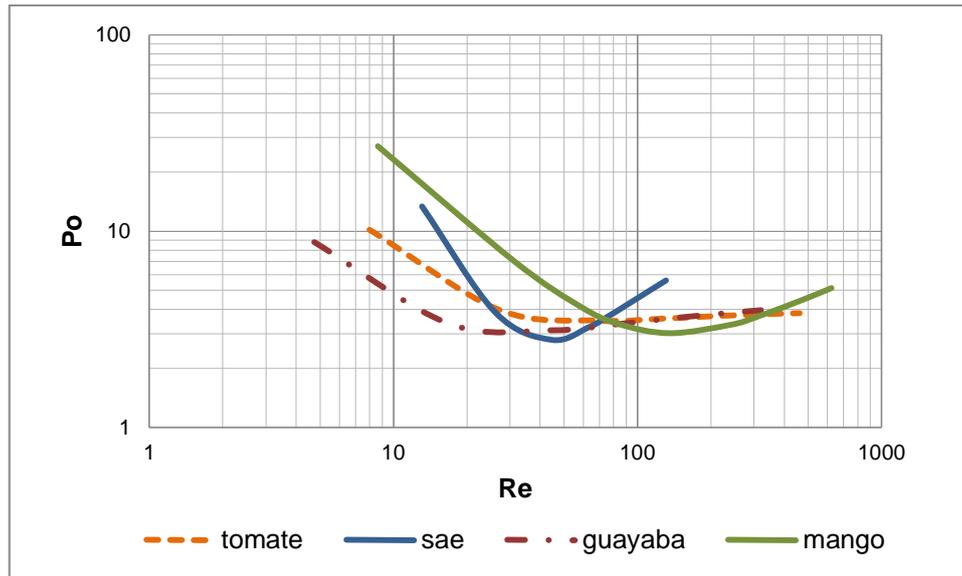


Figura 3.50. Curva de potencia de agitación de rushton sin deflectores

El efecto de las propiedades reológicas en los números de potencia parece ser más notorio en números de Reynolds menores a 35 por la tendencia que estas curvas presentan.

3.6.3.2 Efecto del tipo de agitador en el número de potencia de agitación

Para determinar el efecto entre agitadores se realizó el análisis de varianza de los números de potencia de agitación para cada pulpa de fruta, en la Figura 3.51 y 3.52 se muestran las curvas de potencia de agitación del mango para los diferentes agitadores. No se encontró diferencia en el número de potencia de agitación en los diferentes agitadores.

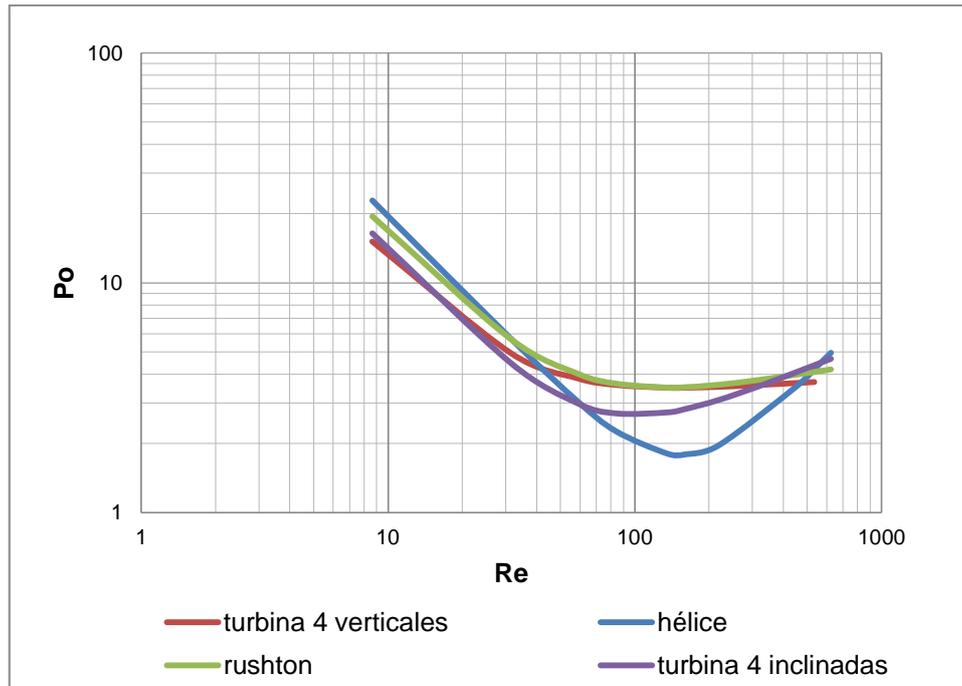


Figura 3.51. Curva de potencia de agitación de mango con deflectores para agitadores hélice, turbina rushton, turbina 4 aspas inclinadas, turbina 4 aspas verticales

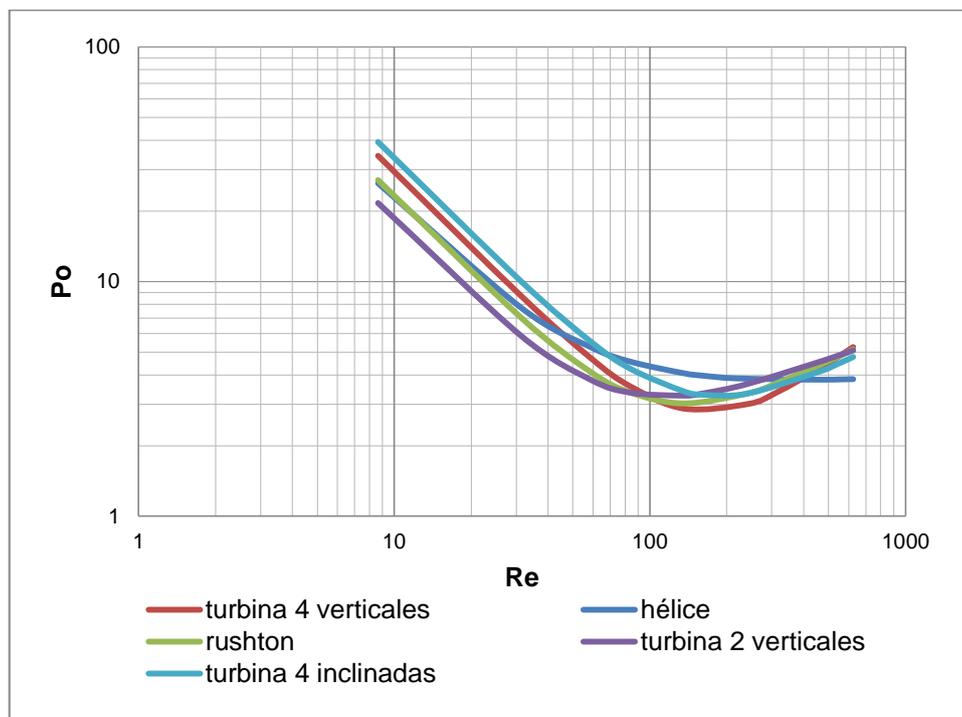


Figura 3.52. Curva de potencia de agitación de mango sin deflectores para agitadores hélice, turbina rushton, turbina 4 aspas inclinadas, turbina 4 aspas verticales y turbina 2 aspas verticales

En las Figuras 3.53 y 3.54 se muestran las curvas de potencia de agitación con y sin deflectores de la pulpa de guayaba para los diferentes agitadores.

En las Figuras 3.55 y 3.56 se muestran las curvas de potencia de agitación con y sin deflectores de la pulpa de tomate de árbol para los diferentes agitadores

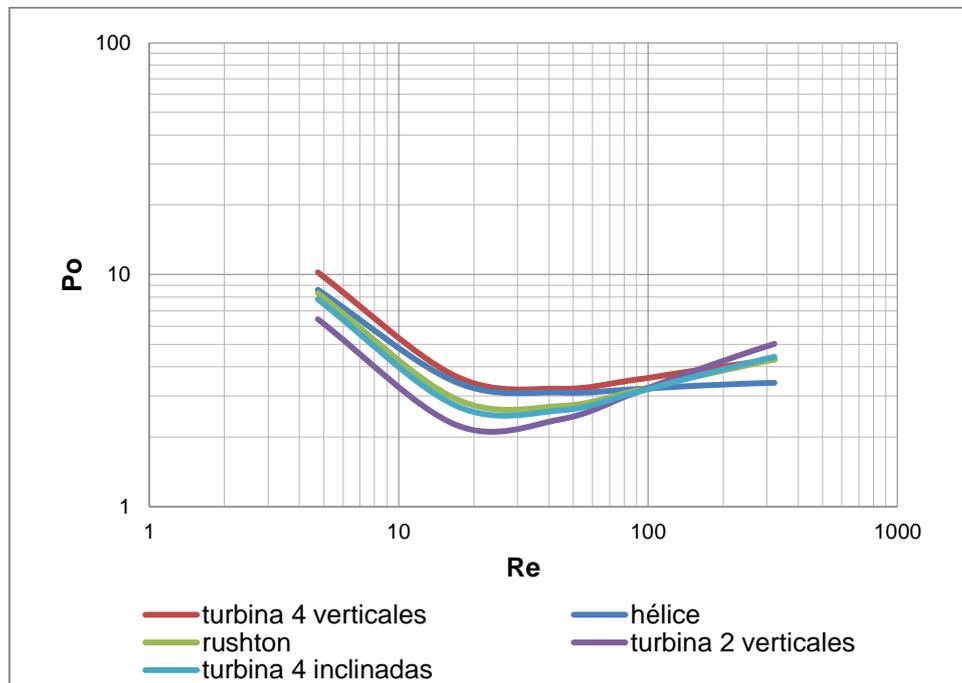


Figura 3.53. Curva de potencia de agitación de guayaba con deflectores para agitadores hélice, turbina rushton, turbina 4 aspas inclinadas, turbina 4 aspas verticales y turbina 2 aspas verticales

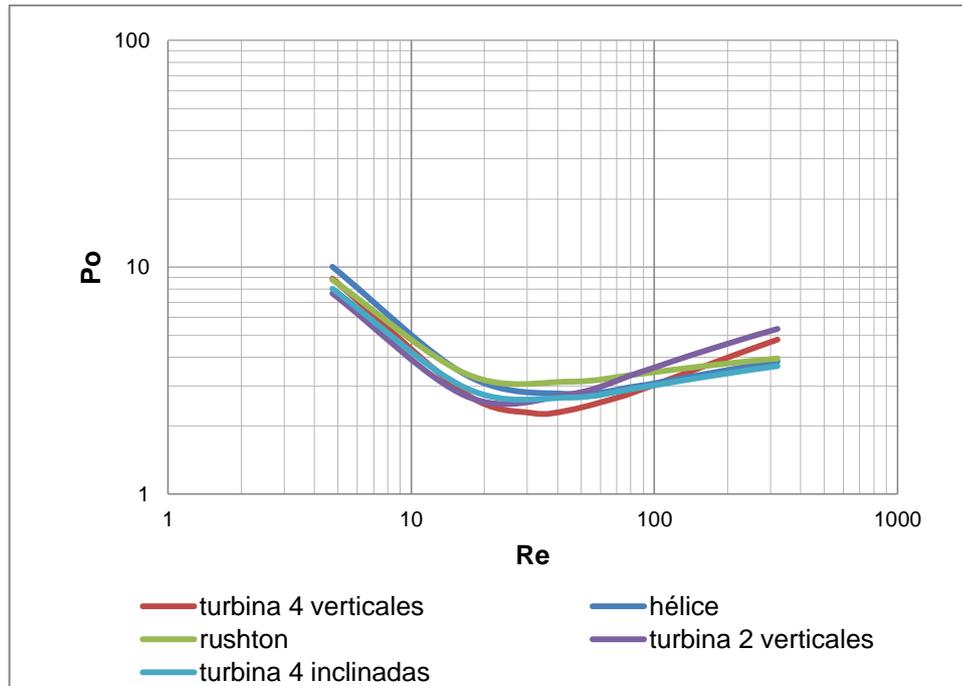


Figura 3.54. Curva de potencia de agitación de guayaba sin deflectores para agitadores hélice, turbina rushton, turbina 4 aspas inclinadas, turbina 4 aspas verticales y turbina 2 aspas verticales

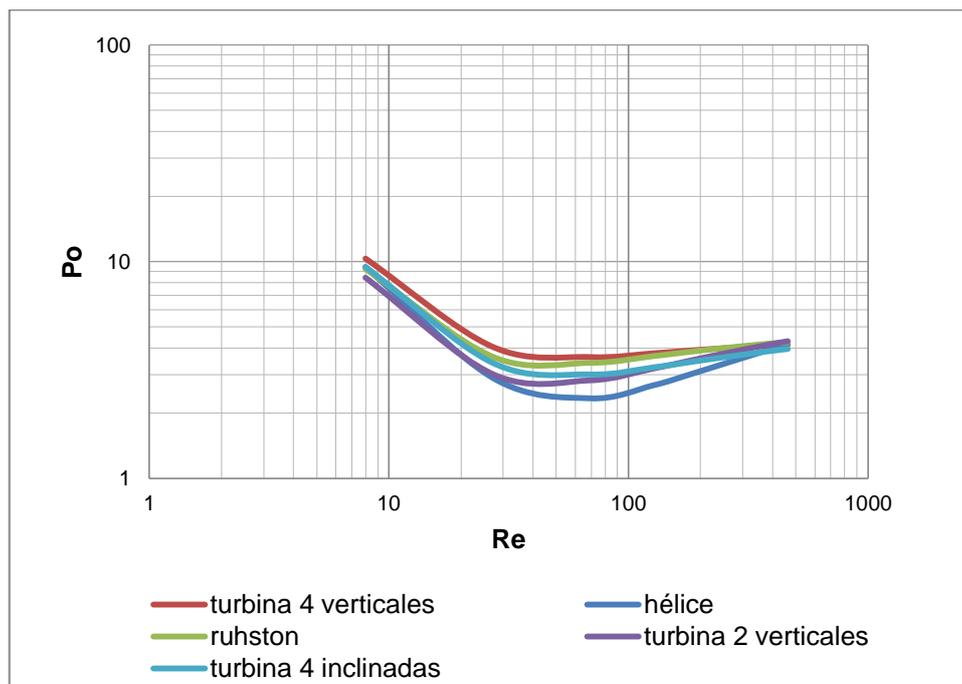


Figura 3.55. Curva de potencia de agitación de tomate de árbol con deflectores para agitadores hélice, turbina rushton, turbina 4 aspas inclinadas, turbina 4 aspas verticales y turbina 2 aspas verticales

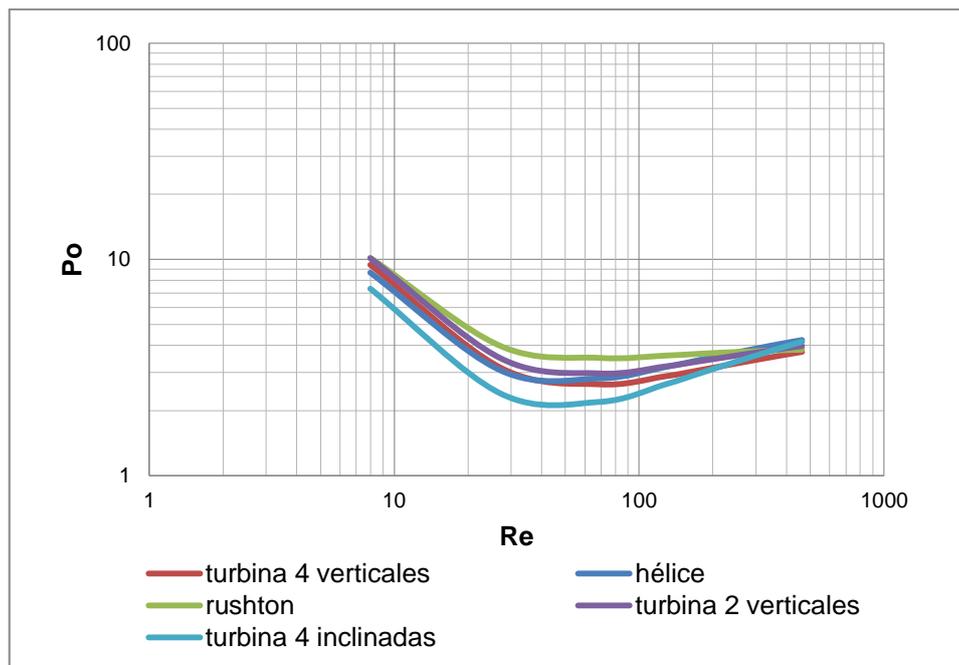


Figura 3.56. Curva de potencia de agitación de tomate de árbol sin deflectores para agitadores hélice, turbina rushton, turbina 4 aspas inclinadas, turbina 4 aspas verticales y turbina 2 aspas verticales

En estas figuras se observan diferentes curvas para tipo de agitador, siendo los más altos las turbinas rushton, de 4 aspas inclinadas y verticales. Los resultados del análisis de varianza de la Tabla 3.28 no muestran un efecto significativo en el número de potencia de agitación, a excepción de las curvas del tomate de árbol con y sin deflectores. Estos resultados se deben a la desviación entre las repeticiones de cada prueba.

Tabla 3.28. Efecto del tipo de agitador en el número de potencia de agitación, curvas gradiente de velocidad

Pulpa de fruta	Deflectores	Re		
		35	60	100
Guayaba	Con	0,099	0,361	0,749
	Sin	0,342	0,471	0,526
Mango	Con	0,458	0,247	0,084
	Sin	0,284	0,284	0,364
Tomate	Con	0,040	0,029	0,049
	Sin	0,039	0,049	0,113

3.6.3.3 Efecto del uso de deflectores en el número de potencia de agitación

Para determinar el efecto del uso o no de deflectores en el número de potencia se realizó un análisis de varianza en tres números de Reynolds de la curva para una fruta con un tipo de agitador y se determinó que los números de potencia con y sin deflectores son similares, el valor estadístico de p está en el orden de 0,2 a 0,8.

3.7 COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DE POTENCIA DE AGITACIÓN POR LAS DIFERENTES METODOLOGÍAS

Las curvas de potencia de agitación determinadas por la metodología de Metzner y Otto, como también de la pendiente permiten determinar el número de potencia de agitación de las pulpas de fruta estudiadas a partir de la curva del fluido newtoniano SAE20W50, considerando la constante k_s respectiva al tipo de fluido y a su agitador. Los resultados de k_s de la pulpa de mango obtenidos por la metodología de la pendiente comprenden valores entre 4,7 y 12,2, mientras que los obtenidos por la metodología de Metzner y Otto están entre 4,0 y 17,1, estos resultados se asemejan al valor teórico de 11, siendo los más precisos los obtenidos por la metodología de la pendiente que además considera la zona lineal del fluido no newtoniano. Los resultados de k_s de las pulpas de guayaba y tomate de árbol obtenidos por la metodología de Metzner y Otto presentan desviaciones aún más altas del 50% y valores de k_s aproximadamente de 60 en la pulpa de guayaba y de 30 en la pulpa de tomate de árbol; resultados que no se pueden afirmar con certeza ya que se obtuvo uno o dos datos dentro de la zona lineal. Se deberían realizar otras pruebas siguiendo la metodología de la pendiente por la precisión del método.

La metodología del gradiente de velocidad propuesta en este trabajo presenta curvas de potencia de agitación particulares para cada pulpa de fruta, esto sucede principalmente en la zona lineal. La ventaja de la metodología del gradiente de velocidad es que permite determinar números de potencia de agitación para relaciones geométricas diferentes a la estándar de la Tabla 1.1.

3.8 DISEÑO DE UN SISTEMA DE AGITACIÓN

3.8.1 ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE AGITACIÓN EN PLANTA

Las especificaciones del tanque de agitación de la planta ENVAGRIF se presentan en la Tabla 3.29.

Tabla 3.29. Especificaciones del tanque de agitación ENVAGRIF

ITEM	Símbolo	Unidad	Valor
Dimensiones			
Volumen	V	m ³	0,28
Diámetro del tanque de agitación	D _t	m	0,6
Nivel de la pulpa	H _l	m	1
Altura del tanque de agitación	H	m	1,5
Diámetro del agitador	D _a	m	0,4
Ancho de la aspa del agitador	w	m	0,1
Espacio de fondo	C	m	0,24
Condiciones de operación			
Velocidad de rotación	N	rpm	108
Pulpa de fruta	Tomate de árbol		
Sin deflectores			

Los datos voltaje e intensidad medidos del motor reductor se muestran en la Tabla 3.30.

Tabla 3.30. Especificaciones del motor reductor de agitación ENVAGRIF

Especificación	Velocidad de rotación (RPM)	Intensidad (A)	Tensión (V)
Motor reductor trifásico	108	2,4	220
$\cos\phi$	0,87		

El esquema del diseño del sistema de agitación de la planta ENVAGRIF, se muestra en la Figura 3.57.

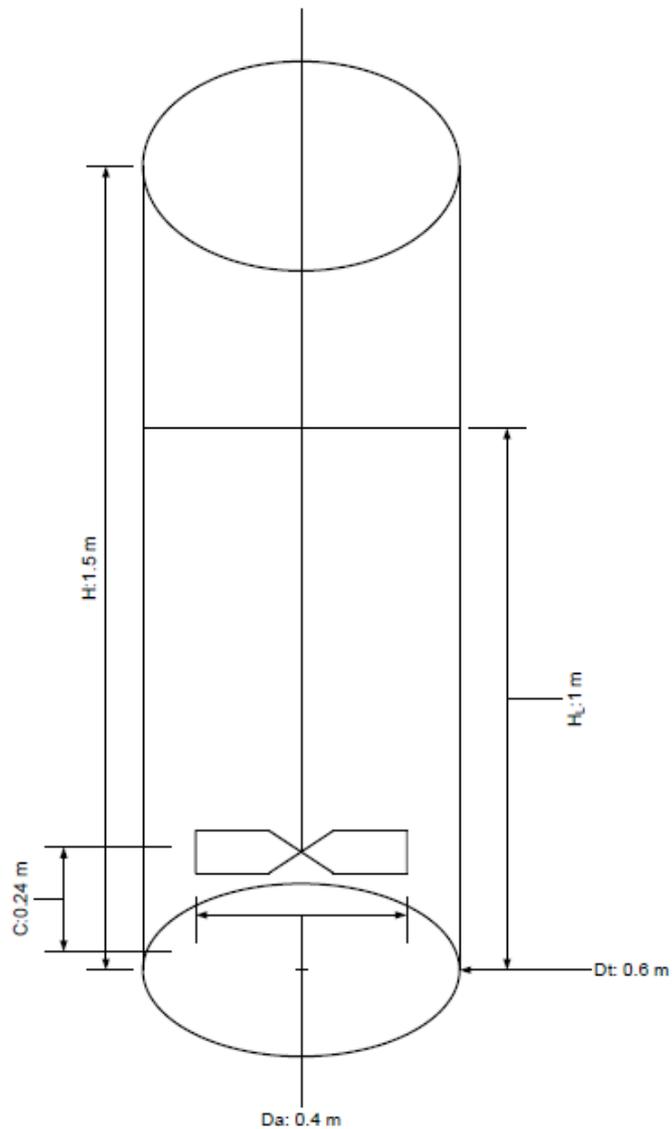


Figura 3.57. Esquema del equipo de agitación de la planta ENVAGRIF

3.8.2 COMPARACIÓN DE LA POTENCIA DE AGITACIÓN TEÓRICA CON LA POTENCIA DE PLANTA

La potencia de agitación de la planta se determinó con los datos de la Tabla 3.30 considerando un 98% de eficiencia eléctrica y un 75% de eficiencia mecánica (MOTOVARIO, s.f, p.5)

La potencia de agitación teórica se determinó usando las curvas de potencia de agitación obtenidas por la metodología de Metzner y Otto y del gradiente de velocidad.

3.8.2.1 Potencia de agitación teórica Metzner y Otto

Para determinar la velocidad de deformación por la metodología de Metzner y Otto se empleó un valor de k_s encontrado en este trabajo, que fue de 26,8 y correspondiente a la pulpa de tomate de árbol y al agitador tipo turbina de 2 aspas. A partir de la ecuación 1.9 se determinó la velocidad de deformación. Se calculó la viscosidad aparente y el número de Reynolds con las ecuaciones 1,3 y 1,8, obteniéndose un número de Reynolds de 439,5.

A partir de la curva de potencia de agitación de la Figura 3.58, mostrada anteriormente (Figura 3.33) y un número de Reynolds de 439,5 se obtiene un número de potencia de agitación igual a 3,5. Se realizó la lectura en la curva de potencia de agitación de la pulpa de tomate.

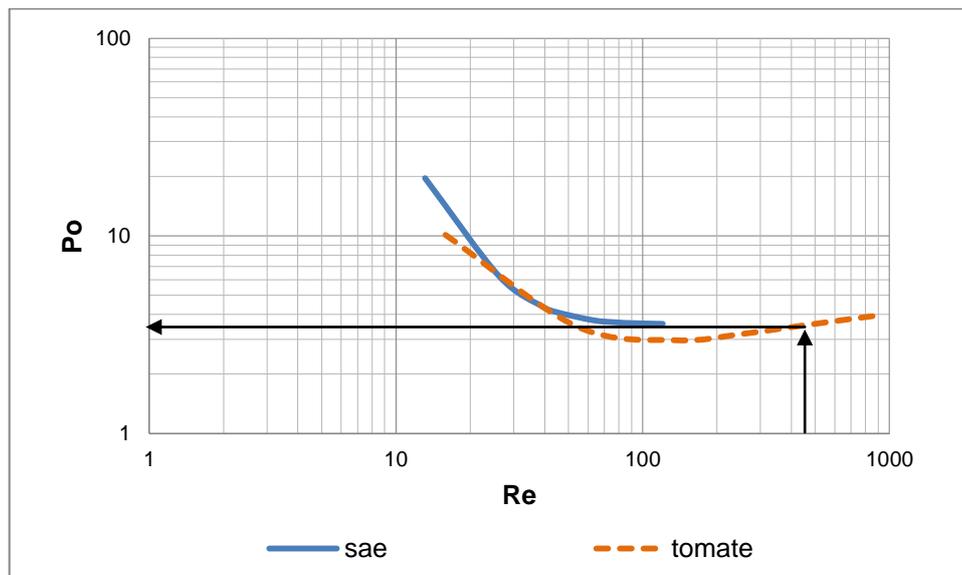


Figura 3.58. Curva de potencia de agitación, turbina 2 aspas sin deflectores. Metzner y Otto

La potencia de agitación teórica se determinó por la ecuación 3.3

$$P = P_0 \rho D_a^5 N^3 \quad [3.3]$$

3.8.2.2 Potencia de agitación teórica Gradiente de velocidad

Para el caso de la metodología del gradiente de velocidad, se emplearon las dimensiones del equipo de agitación de la planta. Reemplazando estas dimensiones en la ecuación 2.13 se obtuvo la ecuación 3.4, para determinar la velocidad de deformación se empleó un factor f de 3.5. Se calculó la viscosidad aparente y el número de Reynolds con las ecuaciones 1,3 y 1,8, obteniéndose un número de Reynolds de 644,6.

$$\gamma = 12,6 f N \quad [3.4]$$

A partir de la curva de la Figura 3.59, mostrada anteriormente (Figura 3.56) y un número de Reynolds 644,6 se obtiene un número de potencia igual a 4,7. El valor de número de potencia obtenido es aproximado porque el número de Reynolds alcanzado en esta figura es de 465 por lo que se tuvo que extrapolar la curva al Reynolds requerido.

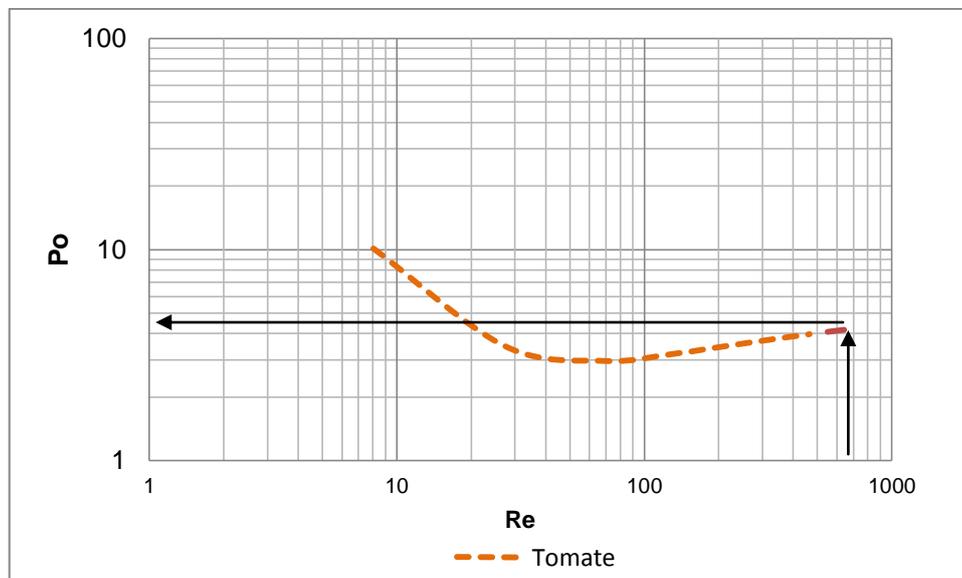


Figura 3.59. Curva de potencia de agitación, turbina 2 aspas sin deflectores, pulpa de tomate de árbol. Gradiente de velocidad

La potencia de agitación teórica se determinó por la ecuación 3.3. En la Tabla 3.31 se muestran los resultados de la potencia calculada en planta y experimental. El valor teórico obtenido por la metodología de Metzner y Otto representa un 36 % de la potencia de agitación en planta; mientras que la potencia determinada por la metodología del gradiente de velocidad representa un 48%. La metodología del gradiente de velocidad se aproxima mejor a la potencia real, seguramente porque se considera la geometría del sistema.

Tabla 3.31. Potencia de agitación experimental y en planta

Potencia (w)	
Potencia eléctrica	795,6
Potencia de agitación planta	584,8
Potencia de agitación teórica (Metzner y Otto)	210,5
Potencia de agitación teórica (Gradiente de velocidad)	282,7

En efecto, las relaciones geométricas del sistema de agitación de la planta son mayores a las relaciones geométricas del sistema experimental. Estas relaciones de presentan en la Tabla 3.32.

Tabla 3.32. Relaciones geométricas del tanque de agitación experimental y en planta

Relación geométrica	Planta	Experimental
$\frac{D_a}{D_t}$	0,67	0,33
$\frac{H_l}{D_t}$	1,67	1

Las proporciones empleadas en la planta son mayores a las experimentales y las recomendadas para una mejor homogenización, sería preferible trabajar a un nivel del líquido igual al diámetro del tanque, en la práctica existirían zonas muertas en la parte superior del tanque (Derksen y Van den Akker, 1999, pp.217 y 218). La relación del diámetro al tanque de agitación también es alta, en fluidos pseudoplásticos se tienen mayores velocidades de corte en los extremos del

agitador, mientras que las partes centrales estas velocidades son menores. Es aconsejable tener una relación diámetro del agitador y diámetro del tanque de 1/3 a 1/2 (McCabe y Smith, pp. 267 y 268, 2002; Aguado, 1999, Wilkens *et al.*, 2003, pp.45 y 48).

3.8.3 VARIACIÓN DE LA POTENCIA DE AGITACIÓN CON LA GEOMETRÍA DEL TANQUE

Si se considera un volumen constante de 0,28 m³ (que es el volumen empleado en la planta ENVAGRIF) y se varían los diámetros y las alturas del tanque de modo que la capacidad volumétrica sea constante, y se mantiene la proporción geométrica del agitador $\frac{D_a}{D_t}$ de 0,66 (utilizado en la planta), se tendrían las configuraciones mostradas en la Tabla 3.33.

Tabla 3.33. Dimensiones del tanque de agitación a diferentes configuraciones

Configuración N°	D _t	D _a	H/D _t
1	0,53	0,35	2,4
2	0,60	0,40	1,7
3	0,71	0,47	1

Si para las dimensiones propuestas en la Tabla 3.33 se calcula el número de Reynolds, número de potencia y potencia de agitación por la metodología de Metzner y Otto, que se explica en el acápite 3.8.2.1 se obtiene los resultados que se indican en la Tabla 3.34.

Tabla 3.34. Valores de potencia, números de Reynolds y números de potencia a diferentes configuraciones

Configuración N°	Re	Po	P(w)
1	338,0	3,3	102
2	439,5	3,5	210
3	584,9	3,7	448

De estos resultados se concluye que la potencia de agitación es diferente para un volumen constante si las configuraciones son diferentes. En la configuración N°3 de la Tabla 3.34, se observa que la potencia de agitación es mayor con respecto a las otras configuraciones debido a que el diámetro del agitador es más grande. En cambio en la configuración N°1 se tiene un consumo de potencia menor, pero la relación del nivel de líquido H/D_t a emplearse es superior al diámetro del recipiente; esta configuración provocaría una homogenización ineficiente hecho que no ocurriría si la relación H/D_t fuese de 1. Con la finalidad de obtener una mejor homogenización lo ideal sería emplear la configuración N°3 (McCabe y Smith, pp. 267 y 268, 2002; pp 249, 1998).

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

1. Las pulpas de fruta de guayaba, mango y tomate de árbol presentaron un comportamiento no newtoniano pseudoplástico, el índice de consistencia fue de 27,383; 17,072; 12,646 respectivamente y el índice de comportamiento reológico fue de 0,169; 0,141; 0,237 respectivamente, a una temperatura de 20 °C.
2. En las curvas de potencia de agitación, obtenidas por la metodología de Metzner y Otto, se determinó que no existe una diferencia significativa sobre los números de potencia de agitación para las pulpas de fruta estudiadas. Esto se dio en números de Reynolds menores que 100.
3. Existe una diferencia significativa en los números de potencia de agitación entre la pulpa de mango con las pulpas de tomate y guayaba en la zona lineal de las curva de potencia de agitación, obtenidas por la metodología del gradiente de velocidad.
4. El empleo de deflectores en la agitación de las pulpas de fruta de estudio no causó efecto en el consumo de potencia; así como también el número de Froude sobre el número de potencia de agitación en números de Reynolds menores de 1 200.
5. El tipo de agitador influyó de manera significativa en el número de potencia de agitación al inicio de las curvas de potencia de agitación por la metodología de Metzner y Otto. Los agitadores de mayor consumo de potencia son las turbinas de 4 aspas inclinadas y verticales.
6. La constante de proporcionalidad de la velocidad de deformación con la velocidad de rotación depende de las propiedades reológicas de las pulpas de guayaba, mango y tomate de árbol, como también del tipo de agitador.

7. El consumo de potencia de agitación de la pulpa de tomate de árbol teórico representó aproximadamente la mitad de la potencia de agitación empleada en la planta.

4.2 RECOMENDACIONES

1. Para evaluar la velocidad de deformación por otras metodologías se debería emplear fluidos newtonianos de alta viscosidad, de manera que se pueda obtener números de Reynolds en la zona laminar.
2. Para determinar la constante de proporcionalidad de k_s de la velocidad de deformación con la velocidad de rotación se debería seguir la metodología de la pendiente.
3. Para establecer la velocidad de rotación de la agitación se debe evaluar cuál es la más favorable para la homogenización del producto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Adamiak, R., y Karckz, J. (2007). Effects of Type and Number of Impellers and Liquid Viscosity on the Power Characteristics of Mechanically Agitated. *Versita*, 61(1), 16-23.
2. Aguado, J. (1999). *Ingeniería Alimentaria* (Vol. II). Madrid, España: Síntesis.
3. Andrade, R., Ortega, F., Montes, E., Torres, R., Pérez, O., Castro, M., y otros. (2009). Caracterización fisicoquímica y reológica de la pulpa de guayaba (*Psidium guajava L.*) variedades *Híbrido de Klom Sali, Puerto Rico, D14* y *Red. VITAE*, 16(1), 13-18.
4. Brookfield Engineering Labs, I. (s.f.). *Brookfield DV-II+ programmable viscometer, Manual No. M/97-164-D1000*. USA.
5. Brookfield Engineering Labs., I. (s.f.). *More solutions to sticky problems*. 22,37,40.
6. Cavadas, A., y Pinho, F. (Noviembre, 2001). Power consumption of polymer solutions in a stirred vessel powered by an hyperboloid impeller. En "Rheology and fluids mechanics of nonlinear materials" *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, 1-9.
7. Chapple, D., Kresta, M., Wall, A., y Afacan, A. (2002). The effect of impeller and tank geometry on power number for a pitched blade turbine. *IChemE*, 80(Part A), 364.
8. Chhabra, R., y Richardson, J. (2008). *Non-newtonian flow and applied rheology engineering applications* (2da ed.). Reino Unido: Elsevier.
9. Couper, J., Penney, W., Fair, J., y Walas, S. (2005). *Chemical process equipment selection and desing* (2da ed.). USA: Elsevier.

10. Cudak, M., y Karcz, J. (2006). Momentum Transfer in an Agitated Vessel. *Versita*, 60(5), 375.
11. Doran, P. (2013). *Bioprocess Engineering Principles (2da ed.)*. UK: Elsevier
12. Derksen, J., y Van den Akker, H. (1999). Large Eddy Simulations on the Flow Driven by a Rushton Turbine. *AIChE Journal*, 45(2), 209.
13. Foucault, S., Ascanio, G., y Tanguy, P. (2004). Coaxial Mixer hydrodynamics with newtonian and non-newtonian fluids. *Chem. Eng. Technol.*, 27(3), 324.
14. Geankoplis, C. (2002). *Procesos de transporte y operaciones unitarias (3 ra ed.)*. México: Continental.
15. Hermida, J. (2000). *Fundamentos de ingeniería de procesos agroalimentarios*. Madrid, España: Mundi Prensa.
16. Jahangiri, M. (2008). Share rates in mixing viscoelastic fluids by helical ribbon impeller. *Iranian Polymer Journal*, 17(11), 831.
17. Kelessidis, V., y Hatzistamou, V. (2011). Preparation Methodology and Rheological Properties of Yield Pseudoplastic Transparent Fluids. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 32(3), 380.
18. Knoch, A. (1999). Influence of non-newtonian flow behavior on mixing process characteristics. *Chemical Engineering Technology*, (22), 112-117.
19. McCabe, W., y Smith, J. (1998). *Operaciones en ingeniería química (4ta ed.)*. España: EDIGRAFOS S.A.
20. McCabe, W., y Smith, J. (2002). *Ingeniería Química Operaciones Básicas (6ta ed., Vol. I)*. México D.F., México: McGraw Hill/INTERAMERICANA S.A de C.V.

21. Metzner , A., y Otto, R. (1957). Agitation of non-newtonian fluids. *A.I.ch.E Journal*, 3(1), 3-8.
22. MOTOVARIO. (s.f.). *Instrucciones para el uso y el mantenimiento de motores eléctricos*. Recuperado http://www.motovario-group.com/data/files/QL0219%20%20Instrucciones%20Para%20El%20Uso%20Y%20El%20Mantenimiento%20De%20Motores%20El%C3%A9ctricos%20-%20rev%200%20-%20ES_3102012154138.pdf (Diciembre, 2013).
23. Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos* (6ta ed.). México: Pearson Educación.
24. Murthy, S., Shekhar, y Jayanti, S. (2003). Mixing of power-Law Fluids Using Anchors: Metzner-Otto concept review. *AIChE Journal*, 49(1), 30.
25. NTE INEN. (2008). *Jugos, pulpas, concentrados, néctares, bebidas de fruta y vegetales. Requisitos*. Quito, Ecuador.
26. Perry, R. (2006). *Manual del Ingeniero Químico* (7ma ed.). España: Mc Graw Hill.
27. Ramirez Navas, J. S. (2006). *Introducción a la reología de alimentos* (Vol. 6). Cali, Colombia: ReCiTeIA.
28. Sánchez, J., Rodríguez, M., Casas , J., Fernández, J., y Christi, Y. (2006). Shear rate in stirred tank and bubble column bioreactors. *Chemical Engineering Journal*, 1-5.
29. Tanveer, S., Chandra, U., y Prasad, R. (2006). Rheology of multigrade engine oils. *Indian Journal of Chemical Technology*, 13, 180-184.
30. Thakur, R., Vial, C., Djelveh, G., y Labbafi, M. (2004). Mixing of complex fluids flat-bladed impellers; effect og impeller geometry and highly shear-thinning behavior. *Chemical Enginnering and Processing*, (43), 1211-1222.

31. Vargas, F., Salas, F., y Duarte, C. (2006). Caracterización reológica de pulpa de mango variedad Haden. *Anales científicos UNALM*, 66, 26-37.
32. Wilkens, R., Henry, C., y Gates, L. (Mayo, 2003). How to scale up mixing processes in non newtonian fluids. *CEP*, 44-53.

ANEXOS

ANEXO I

VALORES DE MEDICIONES DEL VISCOSÍMETRO PARA LA OBTENCIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS

Tabla AI.1. Valores de las mediciones realizadas para la obtención de los parámetros reológicos de pulpa de tomate de árbol

Prueba N°1 Ascendente				Prueba N°2 Ascendente				Prueba N°3 Ascendente			
velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	Esfuerzo cortante	velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	Esfuerzo cortante	velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	Esfuerzo cortante
5	9,90E+03	19,6	167	5	1,09E+04	21,8	185	5	1,18E+04	23,5	200
10	5,68E+03	22,7	193	10	6,25E+03	25	213	10	6,75E+03	27	230
20	3,25E+03	26	221	20	3,58E+03	28,6	243	20	3,80E+03	30,3	258
50	1,65E+03	33	281	50	1,79E+03	35,8	304	50	1,89E+03	37,9	322
100	1,04E+03	41,5	353	100	1,12E+03	44,7	380	100	1,18E+03	47,3	402
Prueba N°1 Descendente				Prueba N°2 Descendente				Prueba N°3 Descendente			
velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	Esfuerzo cortante	velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	Esfuerzo cortante	velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	Esfuerzo cortante
5	9,70E+03	19,4	165	5	1,07E+04	21,4	182	5	1,19E+04	23,9	203
10	5,58E+03	22,4	190	10	6,17E+03	24,7	210	10	6,83E+03	27,3	232
20	6,25E+03	25,2	214	20	3,54E+03	28,3	241	20	3,89E+03	31,1	264
50	3,58E+03	32,3	275	50	1,77E+03	35,4	301	50	1,90E+03	38,1	324
100	1,79E+03	41	349	100	1,11E+03	44,4	377	100	1,17E+03	47	400

Tabla A.2. Valores de las mediciones realizadas para la obtención de los parámetros reológicos de pulpa de mango

Prueba N°1	Ascendente			Prueba N°2	Ascendente			Prueba N°3	Ascendente		
velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	Esfuerzo cortante	velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	Esfuerzo cortante	velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	Esfuerzo cortante
5	1,33E+04	26,9	229	5		30,4	258	5	1,16E+04	23,2	197
10	7,10E+03	28,5	242	10	7,90E+03	31,7	269	10	6,25E+03	25,2	214
20	4,03E+03	32,1	273	20	4,36E+03	34,8	296	20	3,58E+03	28,6	243
50	1,88E+03	37,2	316	50	1,91E+03	38,2	325	50	1,67E+03	33,4	284
100	1,04E+03	41,4	352	100	1,10E+03	43,9	373	100	9,50E+02	38	323
Prueba N°1	Descendente			Prueba N°2	Descendente			Prueba N°3	Descendente		
velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	Esfuerzo cortante	velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	Esfuerzo cortante	velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	Esfuerzo cortante
5	1,37E+04	27,4	233	5	1,49E+04	29,6	252	5	1,26E+04	25,2	214
10	7,30E+03	29,4	250	10	7,80E+03	31,2	265	10	6,80E+03	27,3	232
20	3,88E+03	31,1	264	20	4,15E+03	33,4	284	20	3,63E+03	29	247
50	1,82E+03	36,4	309	50	1,90E+03	38,1	324	50	1,65E+03	33,3	283
100	1,04E+03	41,6	354	100	1,10E+03	44	374	100	9,55E+02	38,2	325

Tabla A.3. Valores de las mediciones realizadas para la obtención de los parámetros reológicos de pulpa de guayaba

Prueba N°1 Ascendente				Prueba N°2 Ascendente				Prueba N°3 Ascendente			
velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	Esfuerzo cortante	velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	Esfuerzo cortante	velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	Esfuerzo cortante
5				5,00E+00	2,14E+04	42,1	358	5,00E+00	2,40E+04	48	408
10	1,09E+04	44	374	1,00E+01	1,35E+04	54,3	462	1,00E+01	1,34E+04	53,6	456
20	6,20E+03	50	425	2,00E+01	7,45E+03	59	502	2,00E+01	7,45E+03	59,2	503
50	2,84E+03	56,2	478	5,00E+01	3,30E+03	66,2	563	5,00E+01	3,46E+03	69,2	588
100	1,61E+03	64	544	1,00E+02	1,86E+03	72,2	614	1,00E+02	1,93E+03	77	655
Prueba N°1 Descendente				Prueba N°2 Descendente				Prueba N°3 Descendente			
velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	Esfuerzo cortante	velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	Esfuerzo cortante	velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	Esfuerzo cortante
5	1,82E+04	37,1	315	5,00E+00	2,20E+04	44	374	5,00E+00	2,32E+04	45,5	387
10	1,07E+04	42,7	363	1,00E+01	1,33E+04	52,7	448	1,00E+01	1,34E+04	54,1	460
20	5,90E+03	49,3	419	2,00E+01	7,55E+03	60,1	511	2,00E+01	7,65E+03	61,4	522
50	2,66E+03	59,7	507	5,00E+01	3,42E+03	68,6	583	5,00E+01	3,40E+03	71,8	610
100	1,60E+03	62,6	532	1,00E+02	1,89E+03	72,7	618	1,00E+02	1,91E+03	80	680

Tabla A4. Valores de las mediciones realizadas para la obtención de los parámetros reológicos de aceite SAE20W50

Prueba N°1 Ascendente				Prueba N°2 Ascendente				Prueba N°3 Ascendente			
Velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	SS	Velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	SS	Velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	SS
5	510	5,1	23,7	5	530	5,3	24,6	5	540	5,4	25,1
10	530	10,6	49,3	10	520	10,4	48,4	10	535	10,7	49,8
20	540	21,7	100	20	525	21	97,6	20	535	21,4	99,5
50	550	55,1	256	50	528	52,8	246	50	540	54	251
Prueba N°1 Descendente				Prueba N°2 Descendente				Prueba N°3 Descendente			
Velocidad (rpm)	Viscosidad (ctp)	%	SS	Velocidad (rpm)	Viscosidad(ctp)	%	SS	Velocidad (rpm)	Viscosidad(ctp)	%	SS
5	560	5,6	26	5	560	5,6	26	5	560	5,6	26
10	565	11,3	52,6	10	545	10,9	50,7	10	550	11	51,2
20	560	22,4	104	20	535	21,5	100	20	545	21,8	101
50	562	56,2	261	50	536	53,5	249	50	544	54,5	253

ANEXO II

VALORES DE MEDICIÓN DE FUERZA DE AGITACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE NÚMEROS DE POTENCIA

Tabla AII.5. Valores de fuerza de agitación para SAE20W50 con deflectores

Prueba N°1		Prueba N°2		Prueba N°3		Prueba N°4	
HÉLICE							
HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)
5	8,2	5	8,1	5	6,2	5	4,9
10	2,5	10	3,8	10	5,4	10	5,3
15	6,2	13	3,2	13	6,7	13	3,3
20	14,6	17	7,6	17	8,2	17	8,2
24	5,9	22	9,4	22	11,1	22	9,7
30	21,6	30	19,8	30	18,0	29	22,8
34	25,4	36	30,9	33	38,2	33	30,8
43	25,0	43	26,1	42	38,6	42	43,0
50	42,2	50	39,5	50	40,9	50	42,5
RUSHTON							
HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)		
5	6,9	5	6,7	5	7,3		
10	6,9	10	5,6	10	4,6		
15	5,4	15	7,0	15	6,1		
19	18,6	19	21,3	19	21,9		
23	17,0	23	15,0	23	15,0		
30	34,8	30	31,5	30	30,3		
35	55,7	35	66,1	35	67,9		
43	52,4	43	41,1	43	51,3		
49	110,5	49	108,5	50	133,1		
TURBINA 4 INCLINADAS							
HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)
5	4,0	5	5,1	5	5,6	5	3,7
10	6,1	10	5,9	10	4,9	10	4,4
15	7,1	15	5,1	13	21,2	16	9,7
19	20,7	19	22,3	17	13,7	19	23,4

Tabla AII.5. Valores de fuerza de agitación para SAE20W50 con deflectores
(continuación...)

22	21,8	22	24,5	23	16,7	22	25,3
30	28,0	30	33,5	30	31,8	30	34,9
43	52,7	43	42,3	43	33,2	43	47,5
49	111,7	50	165,0	46	57,9	49	130,5
		49	136,7				
TURBINA 4 VERTICALES							
HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)		
5	2,9	5	2,7	5	3,3		
10	2,1	10	2,7	10	2,1		
17	26,1	17	28,5	17	25,4		
24	31,4	24	33,1	24	32,0		
29	39,4	29	33,0	29	34,0		
34	53,7	34	55,0	34	55,4		
43	44,8	43	39,5	42	80,2		
46	78,4	47	86,6	46	82,2		
50	117,0	50	123,5	50	138,9		
TURBINA 2							
HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)		
5	3,9	5	5,1	5	7,4		
10	5,0	10	6,3	10	4,8		
15	3,9	15	4,6	15	4,8		
17	9,8	17	10,2	17	11,2		
22	9,6	22	12,3	22	11,5		
30	24,2	30	33,5	30	33,3		
35	37,9	35	58,5	35	52,4		
43	49,3	43	61,0	43	54,9		
46	43,2	46	64,9	46	52,2		

Tabla AII.6. Valores de fuerza de agitación para SAE20W50 sin deflectores

Prueba N°1		Prueba N°2		Prueba N°3		Prueba N°4	
HÉLICE							
HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)
5	3,1	5	9,0	5	4,4	5	3,8
10	4,3	10	4,7	10	3,8	10	3,1
15	7,4	15	4,6	15	5,3	15	4,7
17	12,7	17	14,1	17	13,3	17	12,7
22	29,8	24	21,8	24	22,3	24	21,6
30	28,2	30	29,4	30	27,5	30	26,8
35	52,2	35	40,0	35	44,7	35	44,1
43	29,2	43	26,8	43	31,6	43	31,0
46	45,3	46	67,5	46	62,0	46	60,2
50	92,2	50	112,6	50	115,6	50	114,6
RUSHTON							
HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)		
5	3,5	5	3,3	5	3,6		
10	2,7	10	2,9	10	2,7		
17	27,1	17	27,3	17	22,4		
24	35,1	24	30,3	24	27,5		
29	39,0	29	30,6	29	26,9		
34	59,0	34	56,4	34	54,3		
42	74,0	42	69,8	42	82,3		
46	72,4	46	83,5	46	67,9		
50	147,1	50	145,1	50	165,2		
TURBINA 4 VERTICALES							
HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)		
5	7,0	5	5,5	5	3,2		
10	5,0	10	5,2	10	6,9		
13	19,9	13	20,6	13	20,8		
17	12,3	17	13,3	17	15,2		
22	25,6	22	22,1	22	23,8		
30	32,9	30	38,5	30	36,0		
35	64,2	35	55,1	35	66,3		
43	44,9	43	48,5	43	50,1		

Tabla AII.6. Valores de fuerza de agitación para SAE20W50 sin deflectores
(continuación...)

46	59,0	46	80,7	46	66,4		
50	116,2	50	140,1	50	130,3		
TURBINA 4 INCLINADAS							
HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)		
5	6,6	5	4,3	5	7,5		
10	4,0	10	5,5	10	6,1		
13	19,2	13	21,3	13	22,4		
17	13,8	17	15,7	17	17,9		
22	39,2	22	26,5	22	31,8		
30	28,1	30	33,3	30	32,2		
35	54,1	35	65,5	35	64,5		
43	44,0	43	47,8	43	44,3		
46	88,5	46	85,1	46	77,9		
50	167,9	50	144,4	50	133,5		
TURBINA 2							
HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)		
5	5,3	5	3,6	5	6,4		
10	4,9	10	4,9	10	5,1		
15	5,2	15	8,1	15	8,4		
17	14,2	17	12,1	17	13,0		
24	27,1	24	22,1	24	22,2		
30	30,7	30	26,0	30	32,7		
35	59,0	35	52,6	35	53,2		
43	39,8	43	42,4	43	39,4		
46	89,6	46	67,9	46	76,8		
		48	116,4				

Tabla AII.7. Valores de fuerza de agitación para guayaba

DEFLECTORES						SIN DEFLECTORES					
Prueba N°1		Prueba N°2		Prueba N°3		Prueba N°1		Prueba N°2		Prueba N°3	
HÉLICE						HÉLICE					
H _z	F(g)	H _z	F(g)	H _z	F(g)	H _z	F(g)	H _z	F(g)	H _z	F(g)
5	2,2	5	3,2	5	2,4	5	3,0	5	3,3	5	2,9
10	1,9	10	2,7	10	2,0	10	2,7	10	3,5	10	3,5
17	11,8	17	11,8	17	11,2	17	11,5	17	11,8	17	11,4
24	22,6	24	25,1	24	22,0	24	17,9	24	17,8	24	17,9
29	25,5	29	30,2	29	37,4	29	30,0	29	32,3	29	32,2
34	52,9	34	47,4	34	47,7	34	55,1	34	51,6	34	53,0
43	76,0	43	31,7	43	65,8	43	75,6	43	74,6	43	76,5
47	112,5	47	110,5	47	107,6	47	109,4	47	109,2	47	101,5
50	103,2	50	96,5	50	114,2	50	127,1	50	114,6	50	110,6
RUSHTON						RUSHTON					
H _z	F(g)	H _z	F(g)	H _z	F(g)	H _z	F(g)	H _z	F(g)	H _z	F(g)
5	2,2	5	2,5	5	3,0	5	3,2	5	2,5	5	2,3
10	3,4	10	2,8	10	3,0	10	2,7	10	3,0	10	2,7
17	11,7	17	12,1	17	13,2	17	20,3	17	11,5	17	14,1
24	21,6	24	23,2	24	22,6	24	24,7	24	17,6	24	16,9
29	36,8	29	34,1	29	35,8	29	22,6	29	45,9	29	31,9
34	48,6	34	51,6	34	64,8	34	58,6	34	49,0	34	56,7
43	69,5	43	56,8	43	44,2	43	66,8	43	62,7	43	63,5
47	116,5	47	129,1	46	87,2	47	112,8	47	113,1	47	114,8
50	142,6	50	123,9	50	130,3	50	113,7	50	125,8	50	112,0
TURBINA 4 INCLINADAS						TURBINA 4 INCLINADAS					
H _z	F(g)	H _z	F(g)	H _z	F(g)	H _z	F(g)	H _z	F(g)	H _z	F(g)
5	2,0	5	3,0	5	2,1	5	1,9	5	2,0	5	3,5
10	2,4	10	2,8	10	2,9	10	2,0	10	2,7	10	3,3
17	11,3	17	11,0	17	10,9	17	14,8	17	17,8	17	24,8
24	16,1	24	14,5	24	14,5	24	13,4	24	15,4	24	19,8
29	33,6	29	43,7	29	40,6	29	12,1	29	40,2	29	30,1

Tabla AII.7. Valores de fuerza de agitación para guayaba (continuación...)

34	55,0	34	55,7	34	58,4	34	47,9	34	46,4	34	48,7
43	71,7	43	63,8	43	59,4	43	71,4	43	73,3	43	69,6
47	118,6	47	111,8	47	105,3	47	102,5	47	106,8	47	104,5
50	151,4	50	116,7	50	146,7	50	117,4	50	99,8	50	109,1
TURBINA 4 VERTICALES						TURBINA 4 VERTICALES					
Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)
5	3,4	5	3,4	5	2,7	5	2,4	5	2,7	5	3,1
10	3,0	10	3,0	10	2,5	10	3,3	10	2,7	10	3,5
17	11,5	17	11,5	17	11,4	14	33,8	17	11,7	17	15,1
24	16,1	24	15,9	24	17,6	17	16,6	24	24,4	24	31,8
29	36,6	29	40,9	29	29,5	22	49,4	29	31,9	29	37,9
34	57,5	34	61,2	34	60,2	24	31,6	34	45,9	34	50,0
43	44,5	43	48,8	43	51,3	29	35,6	42	57,4	43	48,4
47	132,3	47	128,7	47	122,6	34	43,2	47	118,1	47	128,7
50	122,7	50	126,7	50	112,8	42	66,3	50	160,1	50	147,2
						47	117,2				
						50	143,0				
TURBINA 2						TURBINA 2					
Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)
5	1,5	5	1,9	5	2,5	5	2,4	5	2,1	5	2,6
10	2,1	10	2,8	10	2,4	10	2,8	10	3,2	10	4,3
17	9,8	17	13,2	17	13,4	17	12,8	17	12,4	17	14,7
24	18,2	24	24,0	24	22,8	24	21,0	24	19,9	24	17,1
29	33,3	29	51,9	29	27,1	29	39,9	29	45,5	29	54,1
34	59,0	34	56,2	34	55,1	34	55,0	34	59,6	34	56,0
43	106,1	43	109,9	43	100,1	43	89,5	43	84,1	43	90,0
47	123,4	47	112,8	47	117,0	47	157,8	47	145,3	47	144,5
50	134,2	50	168,4	50	163,1	50	158,2	50	165,2	50	147,5

Tabla AII.8. Valores de fuerza de agitación para mango

DEFLECTORES						SIN DEFLECTORES							
Prueba N°1		Prueba N°2		Prueba N°3		Prueba N°1		Prueba N°2		Prueba N°3		Prueba N°4	
HÉLICE						HÉLICE							
HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)		
5	8,3	5	8,0	5	5,5	5	11,8	5	10,1	5	3,1		
10	3,1	10	5,7	10	6,0	10	21,1	10	17,2	10	8,9		
14	18,0	14	18,6	14	16,8	14	17,2	14	16,3	14	16,2		
17	11,9	17	13,9	17	13,0	17	9,1	17	9,9	17	10,1		
22	18,9	22	25,3	22	26,4	22	13,4	22	12,5	22	15,7		
24	21,9	24	23,2	24	22,1	24	22,7	24	22,0	24	21,7		
29	27,3	29	20,3	29	24,0	29	28,5	29	28,6	29	21,4		
42	69,3	42	66,4	42	72,7	42	93,4	42	98,3	42	91,1		
47	86,8	47	90,2	47	80,2	47	174,2	47	133,5	47	99,6		
50	156,7	50	163,2	50	163,3	50	125,7	50	133,4	50	137,0		
RUHSTON						RUSHTON							
HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)
5	5,2	5	7,6	5	5,8	5	5,5	5	8,4	5	18,8	5	11,9
10	4,5	10	7,6	10	5,2	10	5,1	10	8,1	10	24,8	10	16,6
14	21,3	14	21,1	14	20,7	14	18,1	14	18,5	14	15,1	14	14,4
17	15,6	17	18,0	17	17,7	17	13,6	17	12,8	17	9,9	17	11,2
22	36,7	22	35,8	22	35,4	22	28,3	22	19,1	22	13,4	22	13,7
24	27,0	24	25,9	24	25,4	30	33,7	30	47,1	30	60,7	30	57,7
29	30,3	29	26,8	29	28,5	35	64,6	35	65,6	35	49,7	35	59,6
43	56,7	34	56,7	34	62,9	43	50,7	43	65,9	43	75,7	43	68,0
46	87,6	43	64,5	43	91,1	50	154,8	50	163,7	50	172,5	50	170,5
50	121,9	46	96,7	46	130,2								
		50	116,7	49	152,5								
TURBINA 4 INCLINADAS						TURBINA 4 INCLINADAS							
HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)		
5	5,0	5	5,2	5	5,4	5	10,9	5	13,2	5	13,4		
10	5,6	10	6,6	10	7,4	10	15,0	10	20,9	10	25,3		
14	16,4	14	16,2	14	19,8	14	15,0	14	18,4	14	17,6		
17	13,2	17	14,1	17	15,0	17	10,6	17	10,1	17	11,2		

Tabla AII.8. Valores de fuerza de agitación para mango (continuación...)

22	24,0	22	22,8	22	25,1	22	9,7	22	11,9	22	14,1		
24	21,5	24	22,3	24	23,1	24	21,8	24	20,8	24	19,7		
29	31,4	29	35,5	29	31,2	30	60,1	30	44,9	30	40,3		
35	64,3	34	50,7	34	53,9	43	57,9	35	57,5	35	58,1		
43	88,9	43	75,3	43	76,1	46	63,5	43	85,7	43	98,2		
46	83,6	46	86,8	46	90,3	50	150,5	50	148,6	50	154,1		
50	156,0	49	152,9	49	105,0								
TURBINA 4 VERTICALES						TURBINA 4 VERTICALES							
HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)
5	3,2	5	4,5	5	6,8	5	10,0	5	9,7	5	15,9	5	8,0
10	4,7	10	5,3	10	6,7	10	16,2	10	8,2	10	24,4	10	12,2
14	15,5	14	17,8	14	18,3	14	16,3	14	14,3	14	17,3	14	17,0
17	15,3	17	15,6	17	16,9	17	11,7	17	10,0	17	10,8	17	11,1
22	26,8	22	29,3	22	24,6	22	15,0	22	10,5	22	12,8	22	12,3
24	20,4	24	16,5	24	16,3	30	53,1	24	14,4	24	14,4	24	14,2
29	34,6	29	34,6	29	25,6	35	46,2	30	53,1	30	50,8	30	46,2
34	53,0	34	53,1	34	50,8	43	91,9	35	52,8	35	53,4	35	53,6
43	82,0	43	88,6	43	89,0	50	186,5	43	83,5	43	83,9	43	68,7
46	89,6	46	91,5	46	96,9			46	94,1	46	62,7	46	73,4
50	124,4	50	118,9	50	116,8			50	181,4	50	132,2	50	184,1
						TURBINA 2							
						HZ	F(g)	HZ	F(g)	HZ	F(g)		
						5	7,7	5	3,2	5	9,6		
						10	10,2	10	9,2	10	9,0		
						14	19,0	14	16,9	14	23,2		
						17	12,4	17	11,9	17	15,6		
						22	17,2	22	18,0	22	31,8		
						24	21,6	24	25,1	24	22,9		
						30	35,7	30	42,1	30	41,9		
						43	59,0	35	67,6	35	71,2		
						46	91,5	43	85,3	43	83,6		
						50	153,3	46	179,9	46	76,6		
								50	155,4	50	157,4		

Tabla AII.9. Valores de fuerza de agitación para tomate

DEFLECTORES						SIN DEFLECTORES					
Prueba N°1		Prueba N°2		Prueba N°3		Prueba N°1		Prueba N°2		Prueba N°3	
HÉLICE						HÉLICE					
Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)
5	2,6	5	3,7	5	2,2	5	2,6	5	2,6	5	2,6
10	2,5	10	2,8	10	2,9	10	3,1	10	2,5	10	2,5
17	12,1	17	12,5	17	14,9	17	18,0	17	18,7	17	13,0
24	32,8	24	32,0	24	32,0	24	23,7	24	33,5	24	22,8
29	30,8	29	30,2	29	27,0	29	34,1	29	31,5	29	34,1
34	46,2	34	49,7	34	43,8	34	46,0	34	47,2	34	49,3
43	75,2	43	81,6	43	74,1	42	48,3	43	51,5	43	83,1
47	105,1	47	121,5	47	91,2	46	51,9	47	79,2	47	134,2
50	113,4	50	107,0	50	121,3	50	122,5	50	121,7	50	120,5
RUSHTON						RUSHTON					
Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)
5	2,8	5	2,6	5	2,9	5	2,6	5	3,4	5	3,1
10	3,5	10	2,7	10	2,9	10	3,0	10	3,2	10	2,9
17	13,1	17	18,4	17	16,9	17	14,2	17	16,7	17	17,5
24	27,8	24	31,7	24	33,6	24	16,2	24	18,2	24	18,8
29	27,5	29	36,5	29	35,8	29	32,4	29	61,1	29	55,5
34	58,6	34	54,1	34	67,7	34	60,4	34	65,0	34	65,3
43	44,3	43	49,5	43	41,7	42	70,1	42	61,7	42	63,6
46	102,6	47	101,4	46	95,1	46	95,1	46	96,2	46	100,1
50	132,0	50	127,6	50	140,3	50	110,3	50	87,3	50	119,5
TURBINA 4 INCLINADAS						TURBINA 4 INCLINADAS					
Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)
5	2,6	5	2,8	5	3,1	5	1,9	5	2,2	5	2,5
10	2,2	10	2,1	10	2,5	10	2,5	10	2,4	10	2,5
17	10,4	17	12,3	17	13,0	17	12,8	17	13,8	17	13,7
24	26,6	24	25,9	24	27,8	24	18,7	24	19,9	24	19,2
29	27,7	29	33,5	29	29,6	29	36,5	29	31,9	29	31,7

Tabla AII.9. Valores de fuerza de agitación para tomate (continuación...)

34	45,9	34	52,6	34	50,0	34	66,5	34	60,7	34	62,1
43	81,9	43	67,1	43	69,3	42	65,8	42	68,4	42	61,6
47	115,4	47	112,5	47	105,5	46	74,0	46	80,3	46	69,1
50	106,4	50	122,6	50	113,5	50	133,8	50	128,7	50	121,2
TURBINA 4 VERTICALES						TURBINA 4 VERTICALES					
Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)
5	2,8	5	3,1	5	3,3	5	3,0	5	2,9	5	2,6
10	2,5	10	2,7	10	2,8	10	2,7	10	3,1	10	3,1
17	13,4	17	16,4	17	19,1	17	12,8	17	13,3	17	14,6
24	28,4	24	27,3	24	28,9	24	18,8	24	14,9	24	14,4
29	33,9	29	30,1	29	32,5	29	16,2	29	39,4	29	33,9
34	56,6	34	57,8	34	60,6	34	50,9	34	55,0	34	54,4
43	54,4	43	52,9	43	50,4	43	42,5	42	63,3	42	64,0
46	111,2	46	108,7	46	102,4	47	106,0	46	82,9	46	98,0
50	124,2	50	125,8	50	117,1	50	102,1	50	126,3	50	109,2
TURBINA 2						TURBINA 2					
Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)	Hz	F(g)
5	2,9	5	2,3	5	2,4	5	3,4	5	2,8	5	2,9
10	2,3	10	2,5	10	1,8	10	2,7	10	2,0	10	1,9
17	11,3	17	14,9	17	14,9	17	11,8	17	10,7	17	10,8
24	24,4	24	27,0	24	29,6	24	21,2	24	18,6	24	20,2
29	29,2	29	32,4	29	22,2	29	39,4	29	38,3	29	30,9
34	55,4	34	56,8	34	52,6	34	63,5	34	65,7	34	62,7
43	62,6	43	60,3	43	61,7	43	63,6	43	70,4	43	62,5
46	98,0	47	124,1	46	92,0	46	76,5	46	75,2	46	80,7
50	131,1	50	141,1	50	116,7	50	121,7	50	127,7	50	123,4

ANEXO III

EJEMPLO DE CÁLCULO DEL NÚMERO DE POTENCIA DE AGITACIÓN

Una vez que la fuerza de agitación de un agitador se ajustó a la ecuación potencial, se determinó la fuerza a cada velocidad de rotación experimental.

La determinación del torque se obtuvo de la ecuación A.1, para la pulpa de mango con un agitador turbina de 4 aspas verticales sin deflectores.

$$T = F * d \quad [A.1]$$

Dónde:

T: Torque (N.m)

F: Fuerza (N)

d: Distancia (m)

$$T = 10,9 \text{ g} * \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ g}} * 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 20 \text{ cm} * \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 0,022 \text{ Nm}$$

La potencia se determinó con el producto de potencia y la velocidad de rotación, como se expresa en la ecuación A.2. Para cambiar la velocidad de Hz a rpm se multiplicó por un valor de 29,85.

$$P = 2\pi N * T \quad [A.2]$$

Dónde:

P: Potencia (w)

N: velocidad de rotación (rps)

$$P = 2\pi * (5\text{Hz} * 29,85) \text{ rpm} * \frac{1\text{min}}{60 \text{ s}} * 0,022 \text{ Nm} = 0,34 \text{ w}$$

El valor del número de potencia se determina por la ecuación A.3.

$$P_o = \frac{P}{\rho D_a^5 N^3} \quad [A.3]$$

Dónde:

P_o : Número de potencia (w)

ρ : Densidad del fluido (Kg/m^3)

D_a : Diámetro del agitador (m)

$$P_o = \frac{0,34 \text{ w}}{1072,0 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} 0,057^5 (5\text{Hz} * 29,85 \text{ rpm} * \frac{1\text{min}}{60 \text{ s}})^3} = 34,3$$