

**DESARROLLO DE UN MODELO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DEL
COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO DEL POLÍMERO FUNDIDO EN UN
REACTOR DE POLIMERIZACIÓN**

HERNANDO FRANCISCO DÍAZ TORRES

DAWIN JIMÉNEZ VARGAS

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARTAGENA DE INDIAS

2003

**DESARROLLO DE UN MODELO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DEL
COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO DEL POLÍMERO FUNDIDO EN UN
REACTOR DE POLIMERIZACIÓN**

HERNANDO FRANCISCO DÍAZ TORRES

DAWIN JIMÉNEZ VARGAS

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

JAIRO F. USECHE V.

Ingeniero Mecánico

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARTAGENA DE INDIAS

2003

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma de presidente del jurado

Firma del Jurado

Firma del jurado

Cartagena, Octubre 30 de 2003.

DEDICATORIA

A nuestros padres, Ana Beatriz y
Juan Arnaldo; Ernestina y Hernando.

A nuestros hermanos, Arnaldo,
Wilfredo y Kerlys; Maria, Olga, Ingrid
y Sandra.

A nuestros sobrinos, Ana Maria Y
Nicolás; Andrés, Daniel y Gabriel.

AGRADECIMIENTOS

Deseo darles las gracias a Dios, y a la Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar por darnos la oportunidad de capacitarnos.

También, queremos agradecer especialmente al profesor Jairo Useche Vivero por toda su valiosa asesoría, al igual que a todos nuestros docentes, y al personal directivo y administrativo de la Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar, Edgar Escobar, Juan Carlos Nieto, Carlos Cuadro, Domingo Núñez, Wilman Escorcía, Ingeniero Tomas Patrón y Ingeniero Alfredys De La Espriella, por su colaboración y apoyo en la aplicación de este proyecto de investigación en la institución.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.	31
1. EL PROBLEMA Y LOS OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.	37
1.1 IDENTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	37
1.2 TITULO.	37
1.3 DISCIPLINA CIENTÍFICA.	37
1.4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.	37
1.5 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.	38
1.6 TIPO DE INVESTIGACIÓN.	38
1.7 IMPACTO DE LA INVESTIGACIÓN.	38
1.8 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.	39
1.8.1 Objetivo general.	39
1.8.2 Objetivos específicos.	39
1.9 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.	40
1.10 ESTRATEGIA METODOLÓGICA DE LA INVESTIGACIÓN.	41
1.10.1 Marco teórico.	41
1.10.2 Marco conceptual.	43

1.10.3 Variables.	55
1.10.4 Hipótesis.	56
1.11 ESTRATEGIA OPERATIVA. ADMINISTRACIÓN Y CONTROL DE LA INVESTIGACIÓN.	57
1.11.1 Cronograma de actividades.	57
1.11.2 Presupuesto.	58
1.11.3 Descripción de los equipos.	59
2. AGITACIÓN Y MEZCLA DE LÍQUIDOS.	60
2.1 AGITACIÓN DE LÍQUIDOS.	60
2.2 FINES DE LA AGITACIÓN.	60
2.3 APARATOS DE AGITACIÓN.	61
2.4 AGITADORES	63
2.4.1 Agitadores de hélice.	63
2.4.2 Agitadores de paletas.	65
2.4.3 Agitadores de turbinas.	67
2.5 TIPOS DE FLUJOS EN TANQUE AGITADORES.	69
2.6 FORMA DE EVITAR LOS REMOLINOS.	71
2.7 TUBOS DE ASPIRACIÓN.	76
2.8 VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN.	78

2.9 GRADIENTES Y PERFILES DE VELOCIDAD.	79
2.10 CONSUMO DE POTENCIA EN LOS TANQUES.	82
2.11 SIGNIFICADO DE LOS NÚMEROS ADIMENSIONALES.	86
2.12 CORRELACIONES DE POTENCIA PARA RODETES ESPECÍFICOS.	91
2.13 EFECTO DE LA GEOMETRÍA DEL SISTEMA.	95
2.14 CALCULO DEL CONSUMO DE POTENCIA.	97
2.14.1 Ejemplos calculo de potencia.	100
2.15. CONSUMO DE POTENCIA EN LÍQUIDOS NO NEWTONIANOS.	103
3. MODELACIÓN.	107
3.1. MODELACIÓN Y SUS DIFICULTADES.	107
3.2. SEMEJANZA GEOMÉTRICA.	109
3.3. SEMEJANZA CINEMÁTICA.	113
3.4. SEMEJANZA DINÁMICA.	117
4. INSTRUMENTACIÓN.	118
4.1. PRINCIPIOS DE INSTRUMENTACIÓN.	118
4.2. INSTRUMENTOS.	118
4.3. CLASE DE INSTRUMENTOS.	119
4.4. SISTEMAS DE MEDICIÓN.	121
4.5. CALIBRADO DE INSTRUMENTOS.	123

4.6. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS EN INSTRUMENTACIÓN.	124
4.7. ESPECIFICACIONES DE SENSORES.	126
4.8. REGISTRO DEL TRABAJO EXPERIMENTAL.	132
4.8.1. Introducción al registro experimental.	132
4.8.2 Cuaderno de laboratorio.	132
4.8.3. Sugerencias para el registro.	134
4.8.3.1. Encabezamiento.	134
4.8.3.2. Objetivo.	134
4.8.3.3. Registro de mediciones.	134
4.8.3.4. Instrumentación.	135
4.8.3.5. Procedimiento.	135
4.8.3.6. Diagramas.	135
4.8.3.7. Tablas.	136
4.8.3.8. Graficas.	138
4.8.3.9. Cálculos.	139
4.8.3.10. Conclusiones.	140
4.8.3.11. Bibliografía.	141
4.9. REPORTE DE LABORATORIO.	141
4.10. ESTILO.	142

4.11. PRINCIPIOS GENERALES.	143
4.12. ELABORACIÓN DEL REPORTE.	145
4.12.1. Estructura del reporte.	146
4.12.2. Contenido del reporte.	148
4.12.2.1. Título.	148
4.12.2.2. Resumen.	148
4.12.2.3. Tabla de contenido.	148
4.12.2.4. Notación o nomenclatura.	148
4.12.2.5. Introducción.	149
4.12.2.6. Teoría.	149
4.12.2.7. Procedimiento.	150
4.12.2.8. Resultados.	150
4.12.2.9. Discusión.	151
4.12.2.10. Conclusión.	151
4.12.2.11. Agradecimientos.	152
4.12.2.12. Apéndice.	152
4.12.2.13 Referencias.	152
4.13 RECOMENDACIONES GENERALES PARA UN REPORTE DE CALIDAD.	153

5. IMPORTANCIA DE LOS COMPUTADORES EN LA TOMA DE DATOS.	155
5.1. USO DEL COMPUTADORAS DIGITALES PARA LA INSTRUMENTACIÓN.	155
5.2. CONVERSORES ANÁLOGO DIGITAL.	156
5.3. SELECCIÓN DE CONVERSORES ANÁLOGO DIGITAL.	160
5.4. CONVERSIÓN DIGITAL ANÁLOGO.	162
6. REACTOR INDUSTRIAL.	164
6.1. REACTOR DE POLIMERIZACIÓN DE PETROQUIMA S.A.	164
6.2. COMPARACIÓN DE LAS MEDIDAS DEL DISEÑO TEÓRICO DE ACUERDO A LAS GUÍAS DE DISEÑO DE CHEMINEER.	165
6.3. CONJUNTO DE POLIMERIZACIÓN.	166
7. VALIDACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL.	170
7.1. ESTUDIO EN MODELOS REDUCIDOS.	170
7.2. DETERMINACIÓN DE LA ESCALA DEL MODELO.	170
7.3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO REDUCIDO.	175
7.4. DETERMINACIÓN RANGO DE VELOCIDAD.	176
7.5. DETERMINACIÓN RANGO DE PRESIONES.	177
7.6. DETERMINACIÓN RANGO DE TEMPERATURA.	178
8. CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO DE TRABAJO.	179

8.1. CARBOXIMETIL CELULOSA SODICA.	179
8.1.1. Usos de la Carboximetil celulosa Sódica al 1%.	180
8.2. JUSTIFICACIÓN DE LA CARBOXIMETIL CELULOSA SODICA COMO FLUIDO DE TRABAJO.	181
8.3. EQUIPOS PARA LA PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE CARBOXIMETIL CELULOSA SODICA A 1%.	182
8.3.1. Procedimiento de preparación de la sustancia de trabajo.	183
9. ESTUDIO REOLOGICO DEL FLUIDO DE TRABAJO.	184
9.1. ANÁLISIS REOLOGICO DEL FLUIDO DE TRABAJO (CMC AL 1%).	184
9.2. METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LAS RELACIONES DE VISCOSIDAD.	195
9.3 CURVA REOLOGICA DEL CARBOXIMETIL CELULOSA SÓDICA AL 1%	207
9.4 CALCULO DE LOS VALORES DE N Y K , CONSIDERANDO AL FLUIDO COMO HOMOGÉNEO.	220
9.5 CALCULO DE LOS VALORES DE N Y K, CONSIDERANDO AL FLUIDO CON GRADIENTE DE VELOCIDAD UNIFORME.	221
9.6. CALCULO DE LA VISCOSIDAD APARENTE CONSIDERANDO EL FLUIDO HOMOGÉNEO.	225
9.7. CALCULO DE LA VISCOSIDAD APARENTE CONSIDERANDO EL FLUIDO CON VELOCIDAD UNIFORME.	227

10 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.	229
101. DISEÑO DEL EXPERIMENTO.	229
102. VARIABLES A MEDIR.	230
10.3 DEFINICIÓN DE PUNTOS DONDE SE LLEVARA A CABO LA TOMA DE DATOS.	231
10.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA TOMAR LOS DATOS DE TEMPERATURA EN LOS PUNTOS DE INTERÉS.	235
10.4.1. Instrumentos y accesorios para medir temperatura.	235
10.4.2. Pasos y definición de parámetros para medir temperatura.	236
10.5 TOMA DE DATOS DE TEMPERATURA EN EL REACTOR DE POLIMERIZACIÓN.	237
10.6 DATOS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DE TEMPERATURA.	242
10.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE TEMPERATURA.	246
10.8 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA TOMAR LOS DATOS DE VELOCIDAD EN LOS PUNTOS DE INTERÉS.	247
10.8.1 Instrumentos y accesorios para medir velocidad	247
10.8.2. Pasos y definición de parámetros para medir velocidad.	248
10.9 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE VELOCIDAD.	255
10.10 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA TOMAR LOS DATOS DE	

PRESIONES EN LOS PUNTOS DE INTERÉS.	255
10.11 ANALISIS DE RESULTADOS DE PRESIÓN.	257
11. LINEAS DE FLUJOS EN EL MODELO EXPERIMENTAL DE REACTOR DE POLIMERIZACIÓN UTILIZANDO TRASADORES.	258
11.1. OBJETIVO DE LA EXPERIMENTACIÓN DE USO DE TRASADORES.	258
11.2. MATERIALES Y EQUIPOS PARA REALIZAR LA EXPERIENCIA DE USO DE TRASADORES.	258
11.3. PROCEDIMIENTO PARA USAR TRAZADORES.	258
11.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIENCIA CON TRAZADORES.	259
CONCLUSIONES	
RECOMENDACIONES	
BIBLIOGRAFIA	
ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Cronograma de actividades.	57
Tabla 2. Constante a y b de la Ec. 13.	92
Tabla 3. Valores de las constantes K_L y K_T en la Ecs.(16) y (18) para tanques provisto de cuatro placas deflectoras situadas en la pared y con una anchura igual a 10% del diámetro del tanque.	99
Tabla 4. Comparación diseño teórico y diseño de PETCO.	165
Tabla 5. Dimensiones de Modelo de Reactor De Polimerización.	174
Tabla 6. Especificaciones técnicas del carboximetilcelulosa sódica al 1%.	180
Tabla 7. Datos de viscosidad del Carboximetil celulosa sodica al 1% obtenido con un viscosímetro Stormer.	208
Tabla 8. Variación de los esfuerzos cortantes aplicados al Carboximetil celulosa sodica al 1 %, al variar la Velocidad Angular.	210
Tabla 9. Los valores de velocidad de deformación obtenida obedeciendo al criterio de gradiente de velocidad uniforme.	211
Tabla 10. Valores de velocidad de deformación obtenida obedeciendo al criterio fluido homogéneo y muy finas partículas en suspensión.	212

Tabla 11. Valores de velocidad de deformación obtenidos obedeciendo al criterio que el fluido es Newtoniano.	213
Tabla 12. Valores del torque y de la velocidad angular obedeciendo al criterio de la ley de potencia.	215
Tabla 13. Datos de $\ln M$ y $\ln \Omega$.	216
Tabla 14. Valores de velocidad de deformación obtenidos obedeciendo al criterio que el fluido cumple la ley de potencia y valores de α cercanos a 1.	217
Tabla 15. Valores de de la velocidad de deformación aplicando las ecuaciones que rigen a flujo de Couette.	218
Tabla 16. Valores de logaritmo de los esfuerzos cortantes y velocidad de deformación (flujo homogéneo).	220
Tabla 17. Valores de logaritmo de esfuerzo cortante contra logaritmo de velocidad de deformación (velocidad uniforme).	222
Tabla 18. Viscosidad aparente y velocidad de deformación (Fluido homogéneo).	226
Tabla 19. Viscosidad aparente y velocidad de deformación.	227
Tabla 20. Coordenadas cartesianas de los puntos de interés donde serán medidas las variables.	234
Tabla 21. Datos de temperatura del reactor de polimerización posición 1 del motor y velocidad del agitador 154 RPM.	237

Tabla 22. Datos de temperatura del reactor de polimerización posición 2 del motor y velocidad del agitador 152 RPM.	239
Tabla 23. Datos de temperatura del reactor de polimerización posición 3 del motor y velocidad del agitador 153 RPM. (Todos los datos están en oC).	241
Tabla. 24. Los valores promedios de temperaturas en los de interés cuando el motor esta en la posición 1 y la velocidad de agitador es de 154 RPM.	243
Tabla. 25. Datos estadísticos de los de temperaturas en los de interés cuando el motor esta en la posición 2 y la velocidad de agitador es de 152 RPM.	244
Tabla. 26. Datos estadísticos de los de temperaturas en los de interés cuando el motor esta en la posición 3 y la velocidad de agitador es de 153 RPM.	245
Tabla 27. Valores de velocidad máximo y mínimo para buscar la ecuación lineal entre la velocidad del fluido y el amperaje del motor de corriente continua.	249
Tabla. 28. Datos de amperaje tomado en los puntos de interés.	250
Tabla 29. Valores estadísticos de amperaje en el motor de corriente continua en los puntos de interés.	251
Tabla 30. Valores de velocidades en los puntos de interés utilizando los valores promedios de amperaje.	251
Tabla31. Comparación de datos experimentales de velocidad con datos modelo teórico basado en la teoría de diseño de agitadores.	252
Tabla 32. Comparación de datos experimentales de velocidad con datos	

modelo Computacional. 254

Tabla 33. Presión en los puntos de interés calculados con los valores de
velocidad. 256

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Variables de un proceso de polimerización	46
Figura 2. Procedimiento general para modelizar	49
Figura 3. Parámetros de flujo para fluidos Newtonianos.	52
Figura 4. Tanque agitado típico.	62
Figura 5. Hélices de mezclas: (a) Normal de tres palas. (b) De Cuchilla. (c) Protegida.	64
Figura 6. Agitadores De Paletas: (a) Paletas Planas. (b) Paletas Inclínadas. (c) Agitador de ancla.	66
Figura 7. Rodetes De Agitadores De Turbinas. (a) Abierto De Palas Verticales. (b) De Disco Con Alabes. (c) De Paletas Verticales Curvas. (d) Cerrado De Paletas Curvas Con Un Anillo Difusor.	68
Figura 8. Formación de los vórtices y tipos de flujos en un tanque agitado.	70
Figura 9. Agitador no centrado.	71
Figura 10. Agitador no centrado lateral.	72
Figura 11. Tipo de flujo en un tanque con placas deflectoras y un agitador de hélice montado en el centro.	74

Figura 12. Turbinas múltiples en un tanque de gran altura	75
Figura 13. Tubos de aspiración en un tanque agitado: (a) Agitador de turbina. (b) agitador de hélice.	77
Figura 14. Perfiles de velocidad en un agitador de turbina.	81
Figura 15. Dimensiones características de un agitador de turbina.	83
Figura 16. Fuerzas que actúan sobre un rodete en rotación.	87
Figura 17. Función de potencia Φ frente N_{Re} para un agitador de turbina de seis palas.	93
Figura 18. Función de potencia Φ frente a N_{Re} para agitadores de hélice de tres palas.	94
Figura 19. Correlación de potencia para una turbina de seis palas con fluidos no Newtoniano.	106
Figura 20. Semejanza geométrica en el ensayo con modelos (a) prototipo; (b) modelo a escala un décimo.	111
Figura 21. Semejanza y no semejanza geométrica de flujos: (a) semejantes; (b) no semejantes.	112
Figura 22. Los flujos no viscosos a bajas velocidades son cinematicamente semejantes: (a) los flujos sin superficie libre son cinematicamente semejantes con relaciones de escala de longitud y tiempo independientes; (b) los flujos con	

superficie libre son cinemáticamente semejantes con escala de longitud y tiempo relacionadas por la conservación del número de Froude.	114
Figura 23. Semejanza dinámica en el flujo por debajo de una compuerta. El modelo y prototipo tienen polígonos de fuerzas semejantes, en puntos homólogos, si los números de Reynolds y Froude son iguales en ambos; (a) prototipo (b) modelo.	116
Figura 24. Manómetro de tubo Bourdon.	122
Figura 25. Diagrama que muestra la convención para representar una rotación por medio de un vector.	137
Figura 26. Tabla 1. Modulo de Young.	138
Figura 27. Potencia de la carga en función de la corriente.	139
Figura 28. Estructura de carboximetilcelulosa (CMC).	179
Figura 29. Viscosímetro de Stormer. Las pesas en su caída hacen girar el cilindro móvil dentro del recipiente estacionario, que contiene el líquido. La velocidad del cilindro se lee mediante el contador de revoluciones y cronometro	200
Figura 30. .Viscosímetro de mezcla. Impelente helicoidal con tubo de descarga.	206
Figura 31. Corte Bidimensional Del Reactor.	231
Figura 32. Plano Coordinado Del Reactor.	232
Figura 33. Corte transversal del modelo experimental del reactor de polimerización, destacando los puntos de interés donde se medirán las	233

variables.

Figura 34. Trazado de distribución de velocidades teóricas para el diseño de agitadores y zonas de interés para la medición experimental de la misma. 253

Figura 35. Líneas de flujo en el modelo experimental del reactor de polimerización. 260

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Plano de reactor de polimerización.	266
Anexo B. Tipos de fluidos.	267
Anexo C. Fluidos dependientes del tiempo.	268
Anexo D. Análisis Físicoquímicos practicados a una muestra de Carboximetil celulosa Sódica.	269
Anexo E. Grafica de esfuerzo contra velocidad de deformación según criterio gradiente de velocidad uniforme.	270
Anexo F. Grafica de esfuerzo contra velocidad de deformación criterio fluido homogéneo y muy finas partículas en suspensión.	271
Anexo G. Grafica Valores de velocidad de deformación obtenidos obedeciendo al criterio que el fluido es Newtoniano.	272
Anexo H. Grafica de $\ln M$ contra $\ln \Omega$ para calcular el valor de n según el criterio ley de potencia.	273
Anexo I. Grafica de esfuerzo contra velocidad de deformación criterio ley de potencia.	274
Anexo J. Grafica $\log \tau$ contra $\log du/dy$ según criterio fluido homogéneo.	275

Anexo K. Grafica log τ contra log du/dy según criterio velocidad uniforme.	276
Anexo L. Viscosidad aparente contra velocidad de deformación criterio velocidad uniforme.	277
Anexo M. Comportamiento de la viscosidad aparente es inversamente proporcional al de la velocidad de deformación según criterio de fluido homogéneo.	278
Anexo N. Valores de velocidad de modelo computacional.	279
Anexo O. Coeficiente de arrastres típicos.	280

RESUMEN

En la realización de un modelo experimental de un reactor de polimerización primeramente hay que estudiar las condiciones que gobiernan el sistema que se va a modelar.

Hemos tomado como prototipo un reactor de polimerización de la empresa PETCO S.A, considerando cada una de variables que intervienen en un proceso real de polimerización y aplicamos las condiciones generales para modelar, las cuales son similitud geométrica, similitud cinemática y similitud dinámica. Con el fin de lograr la validación del modelo experimental.

La sustancia de trabajo se escogió teniendo en cuenta las propiedades poliméricas y otras condiciones como son: el polímero no fuera tóxico, oxidante, que fuese transparente con el fin de observar mejor el comportamiento de los flujos, económico y no contamina al medio ambiente. Del estudio de diversos polímeros se seleccionó uno llamado Carboximetil celulosa sódica en una concentración al 1%, el cual cumplía con las condiciones establecidas para ser el fluido de trabajo. Para la selección de éste fue necesario realizar un estudio reológico con el fin de definir sus características y describir su comportamiento.

En la toma de datos velocidad se utilizará sensores de deformación unitaria llamados Strain Gage, la cual es una tecnología de punta aplicada a una diversidad de

problemas de ingeniería, esta tecnología ayuda al desarrollo de la investigación. También se utilizará teorías y conceptos de Mecánica de fluido como el de fuerzas de arrastre, para medir una variable directa y valiéndonos de formulas hallar variable indirectas.

Cabe destacar la importancia del computador y el uso tarjetas electrónicas de adquisición de datos, siendo de gran ayuda para el desarrollo de una investigación, debido a los computadores ayudan visualizar, monitorear y manejar datos experimentales. A nivel mundial el uso de computadores para tomar datos experimentales es fundamental para alcanzar los objetivos de una investigación y al aplicarlo en este trabajo nos ubica a la par de los países de alto nivel de investigación.

Para la comprobación de un modelo computacional es de mucha ayuda la creación de un modelo experimental, ya que sirve para validar los resultados del modelo computacional, es por esto que este trabajo es de gran importancia en el desarrollo de una investigación seria y completa de un fenómeno o del comportamiento de un sistema que se desea modelar.

La realización de este trabajo manifiesta la necesidad de trabajar la ingeniería de una forma interdisciplinaria para que cada profesional aporte de su ciencia los conocimientos a fin de ayudar a resolver un problema o llegar a cabo una investigación.

Abstract: In the realization of an experimental model of a polymerization reactor firstly we have to study the governing conditions of the system we want to model.

We have taken as prototype a reactor of polymerization of the company PETCO S.A, considering each one of variables that intervene in a real process of polymerization and we apply the general conditions to model, which are geometric similarity, cinematic similarity and dynamic similarity, in order to achieve the validation of the experimental model.

The working compound was chosen keeping in mind the polymeric properties and other conditions - Non toxicity, non oxidizing, and clearness (With the purpose of observing better the behaviour of the flows), cheap and non contaminant. After studying several polymers, it was selected one, which is called Sodium carboxyl methyl cellulose at 1%, which fulfilled the established conditions to be the work fluid. For the selection of this polymer was necessary to carry out a reologic study with the purpose to define its characteristics and describe its reological behaviour.

In the measuring of speed data will be used unitary deformation sensors called Strain Gage, which possess a state of the art technology applied to a diversity of engineering problems; this technology is useful in the development of the investigation. Theories and concepts of Fluid Mechanics will also be used like the concept of dragging forces in order to measure a direct variable and through several formulas to find indirect variables.

It is necessary to highlight the importance of the computer and the use electronic cards of acquisition of data, which are very helpful for the development of this investigation, since the computers help visualize and to handle experimental data. The universal use of computers to measure experimental data is fundamental to reach the objectives of

any investigation and as we used it in this particularly work; we are even with the countries of high investigation level.

For the confirmation of a computational model, it is of great help the creation of an experimental model, since it is desirable to validate the results of the computational pattern. For this reason, this work is very important to develop a serious and complete investigation about the behaviour of a modelling system.

The making of this work points out the need of the interdisciplinary work in the field of the engineering so that several professionals contribute valid knowledge to solve a problem or to carry out a scientific investigation.

Keywords: Experimental model of a polymerization reactor, Working compound, Polymeric properties, Sodium carboxyl methyl cellulose at 1%, Unitary deformation sensors, Computational model, among others.

INTRODUCCIÓN

La finalidad de la ciencia es la interpretación del universo por vía de la experimentación y la comprensión de las leyes naturales por el método racional. La ciencia reconoce que sus verdades son tentativas. Aproximaciones basadas en la experimentación y que deben ser refinadas, modificadas o descartadas una vez que aparezca nueva información. El edificio de la ciencia se basa en el conocimiento adquirido vía experimentación, para pronosticar con la ayuda del razonamiento deductivo, el comportamiento pasado o futuro, de la naturaleza.

En años recientes ha existido un renovado interés de los físicos en programas de investigación para la consecución de la posibilidad de una «Teoría Unificada». Tenemos que incluir otros factores para completar una descripción científica del universo. Un gran interrogante que surge en el proceso de investigación es hasta qué punto es peligroso sacar conclusiones sobre la «ciencia», o el «método científico» en general, al tratar un tema como el reduccionismo, o los méritos relativos de la religión y de la ciencia. Las «ciencias locales», como la biología o la química, son muy diferentes de la astronomía o de la física de partículas. En la ciencia local podemos recoger virtualmente cualquier información que deseemos, llevar a cabo cualquier experimento, y (lo más importante de todo) controlamos todas las posibles fuentes de sesgos sistemáticos introducidos por el sistema experimental o por el proceso de reunir observaciones. Los experimentos pueden repetirse de diferentes maneras. Este no es el caso en astronomía: no podemos experimentar con el universo; sólo podemos

aceptar lo que nos ofrece. Lo que vemos está inevitablemente predispuesto por nuestra existencia y nuestra visión de ella: los objetos intrínsecamente brillantes están invariablemente sobre representados en estudios astronómicos. Asimismo, en la física de partículas de alta energía, una gran limitación se impone a nuestra habilidad para experimentar. No podemos alcanzar, experimentando directamente, las muy altas energías requeridas para resolver muchos de los secretos del mundo de las partículas elementales. La filosofía de la ciencia ha dicho mucho sobre el método científico, suponiendo la existencia de un ambiente ideal en el que cualquier experimento deseado es posible. Hasta donde se sabe, se ha tratado la realidad de las posibilidades experimentales limitadas con el mismo entusiasmo.

Hasta hace poco, se pensaba que los físicos deducían las leyes de la naturaleza directamente de la experimentación y de la observación. Las leyes básicas estaban íntimamente ligadas a la experimentación. Hoy, en los programas de investigación, se ha abandonado esa vía y los físicos no deducen las leyes directamente de la experimentación. Procuran, más bien, intuir las leyes básicas partiendo del razonamiento matemático para posteriormente si se puede, o si alguna vez se pudiese comprobarlas a través de la observación o de la experimentación.

Para los programas de investigación en física que buscan encontrar un modelo experimental que entregue una ley única que unifique las cuatro fuerzas de la naturaleza, el uso de la simetría se ha constituido en una poderosísima herramienta, ya que permite que todo el sistema de leyes naturales sea derivado de la necesidad que un cierto patrón abstracto sea invariante en el universo. Con posterioridad, las predicciones de este sistema de leyes pueden ser comparadas con el curso real de la

naturaleza. Es la ruta opuesta a la que habríamos seguido hace un siglo. Entonces, el estudio sistemático de hechos nos habría llevado a sistemas de ecuaciones matemáticas que nos darían las leyes del cambio; después, podría reconocerse que los hechos son equivalentes a alguna teoría global o local de invarianza.

El estado actual del desarrollo del cálculo numérico y la computación permiten en el presente llevar a cabo numerosos tipos de estudios sobre el comportamiento de diversos sistemas mediante modelación matemática, y simulación computacional, no obstante, la modelación experimental todavía sigue siendo una herramienta útil.

Los procesos de experimentación deben ser instrumentados, para disponer de información sobre el estado de su operación. Se debe especificar aquí que se entiende por estado de un proceso. La noción difiere de la noción de estado termodinámico, si bien guarda alguna similitud. Al igual que el estado termodinámico, el estado de un proceso está reflejado por el valor cuantitativo de todas y cada una de las variables que permiten la completa caracterización de la operación; sin embargo, las variables del estado de una planta no requieren estar todas ligadas entre sí en forma explícita, mediante leyes de conservación (que es el caso de las variables termodinámicas de estado). La noción de estado del proceso es más bien simple, pero puede generar un extenso listado de variables. Mediante esta definición se podrá generar un listado de variables, ordenado, que contenga los valores de cada una de ellas, indexado por un número secuencial (una cuenta) y es así como se suele hablar del vector de estado, para referirse al valor de cada una de las variables de proceso que permiten la más completa definición del mismo.

Las variables son cuantificadas por sistemas sensores, es decir, por sensores seguidos de amplificadores (también llamados acondicionadores de señales) que generan una señal eléctrica (si bien existieron los que generaban señales de presión) y, posiblemente, producen una indicación local. Estos sistemas sensores suelen tener capacidad de transmisión de señales, es decir, generan una salida eléctrica cuyo valor es proporcional al valor de la variable medida.

Si se dispone de sistemas sensores con capacidad de transmisión, es posible llevar la información acerca de las variables en proceso, a un sistema computacional que permita mantener una versión actualizada permanente del estado de la planta.

Cuando un modelo experimental requiere del análisis del comportamiento de un fluido es posible ubicarlo dentro de las ciencias reológicas, la cual es la disciplina científica que estudia la deformación y el flujo de la materia. La reología es relativamente joven, de este siglo; es una rama de la física clásica y de las ingenierías, que aparece formalmente en 1928. En ese año, el químico Eugene Cook Bingham, de EE.UU., y un ingeniero civil de Palestina, Marcus Reiner, ambos investigando problemas similares, en particular el flujo de sustancias que son estructuralmente complejas (suspensiones, pastas, geles, entre otras) a través de un tubo, sugirieron proponer a sus colegas una disciplina científica que abordara sistemáticamente los problemas que involucraban estos fluidos. Son muchos los avances que esta ciencia a traído al progreso investigativo la lista sería casi interminable, pero puedo mencionar, y deseo destacar, que sin los conocimientos reológicos no se podrían procesar, por ejemplo, los polímeros sintéticos (caucho, polietileno, etc.) con aditivos para comercializar un sin número de productos provenientes de las industrias del plástico y los elastómeros,

desde un neumático para vehículos hasta una cucharita desechable de café. En el campo biotecnológico, la información obtenida a partir de la R permite diagnosticar patologías caracterizando fluidos biológicos en el contexto de la biorreología (cualquier materia o sustancia de organismo humano, animal o vegetal) y de la hemorreología (para diagnosticar enfermedades en la sangre); en el campo biomédico, permite predecir respuestas de materiales y fluidos en desempeños mecánicos complejos de la vida práctica, desde el de una prótesis (para saber si es mecánicamente compatible) hasta un compuesto industrial tal como una pintura, una fibra textil o un adhesivo.

Asimismo, para producir en forma competitiva, por ejemplo, una rosquilla crocante de maíz, un yogurt con textura agradable al paladar, un dulce de leche repostero o untable en diferentes grados, una mayonesa texturalmente firme, etc., se requiere, inevitablemente, del know-how (es decir, el conocimiento) reológico.

Como se ve, en todos los casos se trata de la aplicación práctica de estos conocimientos en los sectores productivos y de la salud pública. Pero, al mismo tiempo, dentro del marco disciplinario de la Reología, con la finalidad de aplicación que mencioné, al someter a la muestra de material bajo estudio a deformación y flujo se puede obtener información cualitativa y cuantitativa valiosísima. Que nos permite:

- Caracterizar la materia y definir sus parámetros reológicos como viscosidad, consistencia, propiedades elásticas, etc.
- Diseñar equipos sofisticados de procesamiento industrial, conociendo previamente la caracterización de la materia a procesar.

- Diseñar materiales nuevos con respuestas mecánicas muy específicas y bien definidas; entre muchas otras acciones.

1. EL PROBLEMA Y LOS OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 IDENTIFICACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los siguientes tópicos los estudiantes investigadores identificarán y plantearán el problema del presente ejercicio investigativo.

1.2 TITULO

Desarrollo de un modelo experimental para el estudio del comportamiento hidrodinámico del Polímero fundido, en un reactor de polimerización.

1.3 DISCIPLINA CIENTÍFICA

Ingeniería Mecánica

1.4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Estudiar experimentalmente el comportamiento hidrodinámico de Polímeros fundidos en un reactor de polimerización bajo condiciones controladas de operación, mediante la determinación de la distribución y magnitud de variables que describen flujo: Velocidades, presiones, esfuerzos desarrollados, viscosidad, temperatura, etc.

Se propone el desarrollo de un modelo experimental, que permita modelar el fenómeno de flujo bajo estudio.

1.5 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es posible determinar el comportamiento hidrodinámico del Polímero fundido en un reactor de polimerización mediante un modelo experimental del proceso?

1.6 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Es *Experimental* porque se determinará la distribución de velocidad, presión, viscosidad y temperatura en el polímero fundido, así como los esfuerzos desarrollados en el reactor, describiendo la situación real del fenómeno, basado en modelos experimentales para hallar su solución.

1.7 IMPACTO DE LA INVESTIGACIÓN

En la línea que actualmente se está siguiendo en todo el mundo, en este momento, existe un continuo interés en el estudio de las propiedades físico-químicas de los polímeros. Ello se debe a la gran variedad de aplicaciones que estos materiales poseen favoreciendo la investigación aplicada de los polímeros en el sector industrial.

Hoy en día, en la producción de Materiales Compuestos de matriz polimérica se utiliza matriz termoestable debido, fundamentalmente, a su precio. Sin embargo, el precio de los termoplásticos está disminuyendo (polipropileno, polietileno tereftalato, etc.) y junto

con la posibilidad de poderse reciclar, hace muy atractivo industrialmente la sustitución de termoestables por termoplásticos en la producción de compuestos.

Esta sustitución es uno de los objetivos actualmente perseguido por todas la Industrias productoras de Materiales compuestos de matriz termoplástica; aunque es preciso que vaya acompañado de la *caracterización de propiedades mecánicas y estructurales*. Así podemos decir que dentro de la industria de la automoción se tiende a utilizar la mayor cantidad posible de Materiales termoplásticos, para así facilitar el posterior proceso de reciclado, aunque como mínimo, han de mantenerse las propiedades mecánicas.

1.8 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.8.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo experimental que permita estudiar el comportamiento hidrodinámico de Polímeros fundidos en un reactor de polimerización bajo condiciones de operación a través de la medición de variables de interés en el problema.

1.8.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar las estrategias y técnicas experimentales aplicables al análisis de polímeros fundidos en un reactor de Polimerización.

- Determinar mediante medición experimental la distribución de velocidad, presión, temperatura y esfuerzos bajo distintas condiciones de operación de un reactor.

1.9 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se encuentra justificada ya que el desarrollo de un modelo experimental del proceso permite cuantificar variables de interés y obtener datos valiosos del proceso que servirán entre otras cosas, para validar y calibrar un modelo computacional desarrollado de dicho fenómeno.

Desde el punto de vista de la modelación numérica, el desarrollo de un modelo experimental para validación de datos es una etapa fundamental y necesaria en el desarrollo de todo modelo.

Desde el punto de vista aplicado le ofrece a la industria una herramienta especializada que permite caracterizar comportamientos hidrodinámicos en flujos complejos así como el estudio de comportamientos anómalos en el sistema: causas de falla, tal como se presenta en la actualidad*. Le permite a la universidad ofrecer conocimientos y herramientas de vanguardia para la solución de problemas a la industria y principalmente al sector plástico de mucho futuro en la ciudad.

* ARGUELLO FERNÁNDEZ, Álvaro y VÁSQUEZ OTALORA, Cesar. Estudio de análisis de fallas del sistema de transmisión de potencia de los agitadores en los reactores de la empresa PETCO S.A. (0103010). Cartagena, 2002. Trabajo de Grado (Ingeniero mecánico). Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar. Facultad Ingeniería Mecánica.

1.10 ESTRATEGIA METODOLÓGICA DE LA INVESTIGACIÓN

1.10.1 Marco teórico. A nivel mundial el campo de los polímeros se encuentra en constante desarrollo, impulsando nuevas áreas de investigación y generando diversos enfoques científicos y tecnológicos.

Es una tendencia mundial en la ingeniería, la búsqueda de materiales cada vez más ligeros y que ofrezcan mejores propiedades físicas y químicas de allí la gran importancia del estudio de los polímeros puesto que sus características y propiedades brindan alternativas de sustitución de algunos metales.

En la actualidad una de las ciencias que busca conocer el comportamiento de Polímeros es la reología; esta línea de trabajo se refiere al estudio teórico y experimental de las propiedades de los polímeros, copolímeros y mezclas, como así también de polímeros lineales y entrecruzados de estructura controlada. Recientemente se han incorporado diversas líneas de investigación que han llevado al análisis reológico de mezclas compatibles e incompatibles y su modelado. Además se están implementando técnicas ópticas para el estudio no-invasivo de las propiedades de flujo y estado de orientación de polímeros a través de la medición de propiedades ópticas tales como birrefringencia y dicroísmo.

Para la Reología el flujo y deformación de un polímero da lugar a una gran cantidad de fenómenos experimentales desde simple viscosidad, elasticidad, combinación de viscosidad y elasticidad hasta sutiles modificaciones como estabilización del flujo de un

líquido. Existen aplicaciones de estos fenómenos en lubricación, donde se quiere reducir el contenido viscoso y aumentar el contenido elástico de los lubricantes para reducir consumo de energía, en procesamiento de polímeros donde todo esfuerzo en reducir el empirismo en el diseño de un proceso es bienvenido y en control de calidad en producción de polímeros, pero más importante aún tal vez es la explicación molecular de estos fenómenos por medio de teorías razonablemente fundamentadas y verificables experimentalmente.

Es necesario tener en cuenta que la solución de un problema de flujo o deformación más allá de las más simples leyes y condiciones experimentales requiere el uso de métodos numéricos. Afortunadamente, hoy en día estos métodos, en particular los elementos finitos, son bastante conocidos, la solución de un problema de flujo es rutinaria y los requerimientos físicos son satisfechos fácilmente por los computadores actuales.

Aprovechando esta situación, se ha logrado avanzar en la solución por elementos finitos de varios problemas de flujo no isotérmico de líquidos Newtonianos, con el objeto de introducir más adelante en estos programas leyes para líquidos poliméricos según sea requerido por el problema que se quiera plantear. Se ha producido y ensayado exitosamente comparando con resultados analíticos, un programa para flujos axisimétricos y actualmente está en preparación una solución no isotérmica también por elementos finitos de flujos de líquidos Newtonianos en geometrías de plato-plato y cono y plato. Estos programas son útiles para planeación de

experimentos, análisis de posibles leyes constitutivas de polímeros planteadas posteriormente y para análisis de operaciones de procesamiento de polímeros.

También se tiene proyectado modificaciones teóricas de modelos simples del flujo de un polímero en solución como son el modelo de pesas gimnásticas que hasta ahora no ha logrado explicar el efecto de la velocidad de deformación en la viscosidad de un polímero en solución.

1.10.2 Marco conceptual. El desarrollo de las teorías en dinámica de fluidos permitirá explicar las distintas variables que rigen el comportamiento del polímero fundido en un Reactor de Polimerización.

- Reología. Es el estudio del flujo y deformación de la materia. Prácticamente todos los objetos fabricados de materiales poliméricos son procesados mecánicamente y en muchos casos como en fibras y películas sus propiedades se derivan esencialmente del procesamiento. Más importante aun es el hecho que mediciones reológicas son generalmente simples y de gran precisión. Existe la posibilidad de verificar muy exactamente teorías de la estructura y comportamiento de gran variedad de materiales.

El estudio de la reología ha alcanzado auge últimamente debido al progreso en la formulación teórica del problema.

Particularmente en el campo de los polímeros se ha logrado explicar con gran acierto su comportamiento reológico tanto en solución diluida como en el líquido puro.

Asimismo este tipo de conocimiento se ha extendido a otros materiales complejos como geles, suspensiones, coloides y cristales líquidos. Hay aplicaciones en formulaciones de nuevas pinturas que pueden aplicarse con mucha mayor velocidad y hasta en músculos artificiales. Larson ha dicho que esta es la época de oro de los materiales complejos.

- La Reometría Extensional De Polímeros. Consiste en la medición de las propiedades de estiramiento de los polímeros fundidos y soluciones poliméricas, y es de gran importancia en el diseño de procesos tales como el estirado de fibras, el moldeo por soplado, el soplado de film y el termoformado.

- Polímero. Sustancia que consiste en grandes moléculas formadas por muchas unidades pequeñas que se repiten, llamadas monómeros. El número de unidades que se repiten en una molécula grande se llama grado de polimerización. Los materiales con un grado elevado de polimerización se denominan altos polímeros. Los homopolímeros son polímeros con un solo tipo de unidad que se repite. En los copolímeros se repiten varias unidades distintas.

La mayoría de las sustancias orgánicas presentes en la materia viva, como las proteínas, la madera, la quitina, el caucho y las resinas, son polímeros; también lo son muchos materiales sintéticos como los plásticos, las fibras (véase Nailon; Rayón), los adhesivos, el vidrio y la porcelana.*

* "Polímero." *Enciclopedia® Microsoft® Encarta 2001*. © 1993-2000 Microsoft

- Estructura de los polímeros. Los polímeros consisten en grandes moléculas compuestas de otras más pequeñas y repetidas, llamadas monómeros; los polímeros que constan de un único tipo de monómero se denominan homopolímeros. Los que están formados por más de un tipo de monómeros reciben el nombre de copolímeros.

Los polímeros pueden subdividirse en tres o cuatro grupos estructurales. Las moléculas de los polímeros lineales consisten en largas cadenas de monómeros unidos por enlaces como las cuentas de un collar. Ejemplos típicos son el polietileno, el alcohol polivinílico y el policloruro de vinilo (PVC).

Los polímeros ramificados tienen cadenas secundarias que están unidas a la cadena principal. La ramificación puede ser producida por impurezas o por la presencia de monómeros que tienen varios grupos reactivos. Los polímeros compuestos por monómeros con grupos secundarios que forman parte del monómero, como el poliestireno o el polipropileno, no se consideran polímeros ramificados.

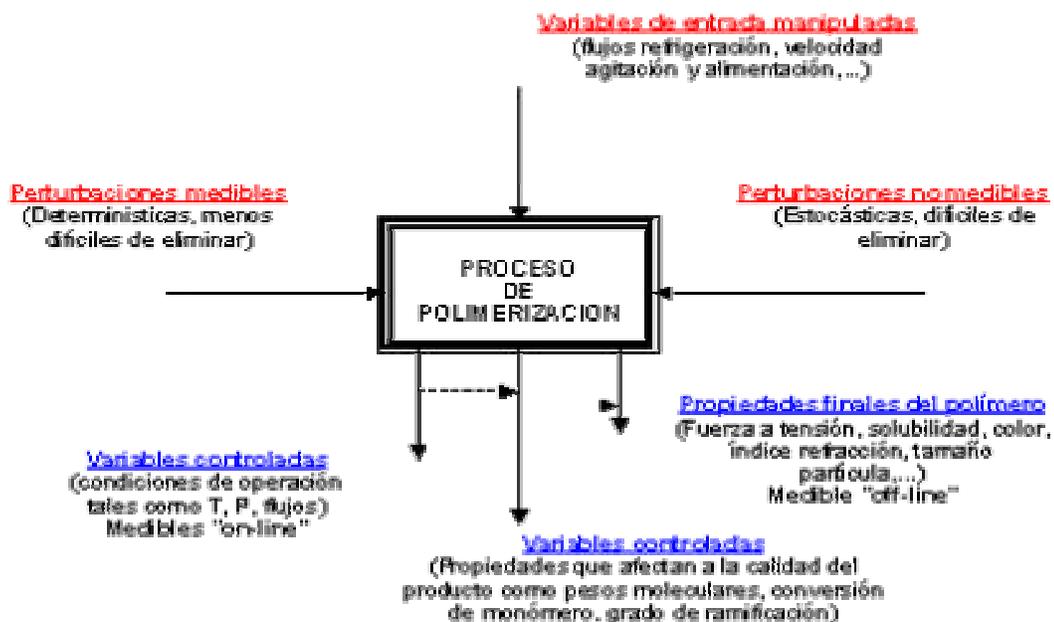
En los polímeros entrecruzados dos o más cadenas están unidas por cadenas secundarias. Con un grado pequeño de entrecruzamiento se obtiene una red poco compacta esencialmente bidimensional. Los grados elevados de entrecruzamiento dan lugar a una estructura compacta tridimensional. El entrecruzamiento es producido normalmente por reacciones químicas. Un ejemplo de estructura entrecruzada bidimensional es el caucho vulcanizado, en el cual los eslabones están formados por átomos de azufre. Los duroplásticos son polímeros entrecruzados con

una estructura tan rígida que al calentarse se descomponen o arden en lugar de fundirse.

- Reactores De Polimerización. Modelización Y Diseño. La polimerización abarca complejas reacciones, lo que conlleva a la formación de estructuras moleculares complejas.

Las condiciones bajo las cuales es llevada a cabo la polimerización tienen un gran efecto sobre la longitud de la cadena, grado de ramificación, distribución en la composición del copolímero, distribución de la secuencia del copolímero y otras medidas de las estructuras moleculares que afectan sus propiedades finales. Estas últimas difíciles de alcanzar debido a la variedad y complejidad de la microestructura. En la figura 1, se representan las variables de un proceso de polimerización.

Figura 1. Variables de un proceso de polimerización



Fuente: Enciclopedia Encarta, Microsoft Corporation ®.

De todo ello, se deduce la importancia que tiene la modelización de la micro estructura de las macromoléculas producidas en reactores de polimerización. Los detalles de la microscopía polimérica determinan las propiedades del producto.

Es clara la necesidad de unir las herramientas de los científicos del campo de los polímeros y del ingeniero, para mejorar tanto el proceso de obtención como las propiedades finales del polímero

El ingeniero de reacciones de polimerización no solo ha de reunir proporciones específicas, producciones y purezas, sino también obtener un producto con ciertas características de procesado y propiedades finales que son, en la práctica, las verdaderas medidas del funcionamiento de los reactores de polimerización (8).

La disponibilidad de un modelo matemático que prediga con precisión las propiedades moleculares del polímero producido en un reactor tiene una gran importancia económica. La llave para realizar un buen modelo es describir matemáticamente los fenómenos químicos y físicos del proceso, obteniendo los balances necesarios de materia, energía y momento. Esta descripción implica ecuaciones no lineales (algebraicas, diferenciales,..).

- La simulación dinámica. Es una parte esencial de estudios de operabilidad o riesgos, que asesora sobre las consecuencias del fracaso de la planta y en la mitigación de los posibles efectos. Mejora la comprensión en las mejoras del proceso y es una herramienta poderosa para la optimización de plantas, tanto en el campo operativo como en el de diseño. Este tipo de simulación tiene igual importancia en procesos continuos, batch, semibatch y procesos cíclicos de manufactura.

Según Kapur (1988) los principios para la modelización matemática son:

- El modelo matemático puede ser solo una aproximación de los procesos reales, los cuales son a menudo muy complejos y a veces parcialmente comprendidos. Es posible desarrollar varios modelos diferentes para un proceso y tener la posibilidad de mejorar la descripción global del mismo.
- Modelizar es un proceso de desarrollo continuo. Se empieza a desarrollar un modelo simple hasta irlo haciendo más complejo. La forma final del modelo deberá proporcionar una descripción razonable del proceso y debe ser capaz de ser usado.
- Modelizar es un arte, pero también un proceso muy importante de aprendizaje. El proceso de modelización sugiere también la necesidad de menos datos o necesidad de la experimentación para descubrir varios aspectos del comportamiento del proceso, que no están bien comprendidos.
- Los modelos deben ser robustos y reales.

La persona que modeliza un proceso está obligado a considerar la naturaleza de todos los parámetros importantes del proceso, sus efectos sobre el mismo y cómo cada parámetro puede ser definido en términos cuantitativos.

Una vez establecido el modelo, entonces puede ser utilizado, con relativa confianza, para predecir el comportamiento del proceso bajo diferentes condiciones y usarlo para el diseño del proceso, su optimización y control.

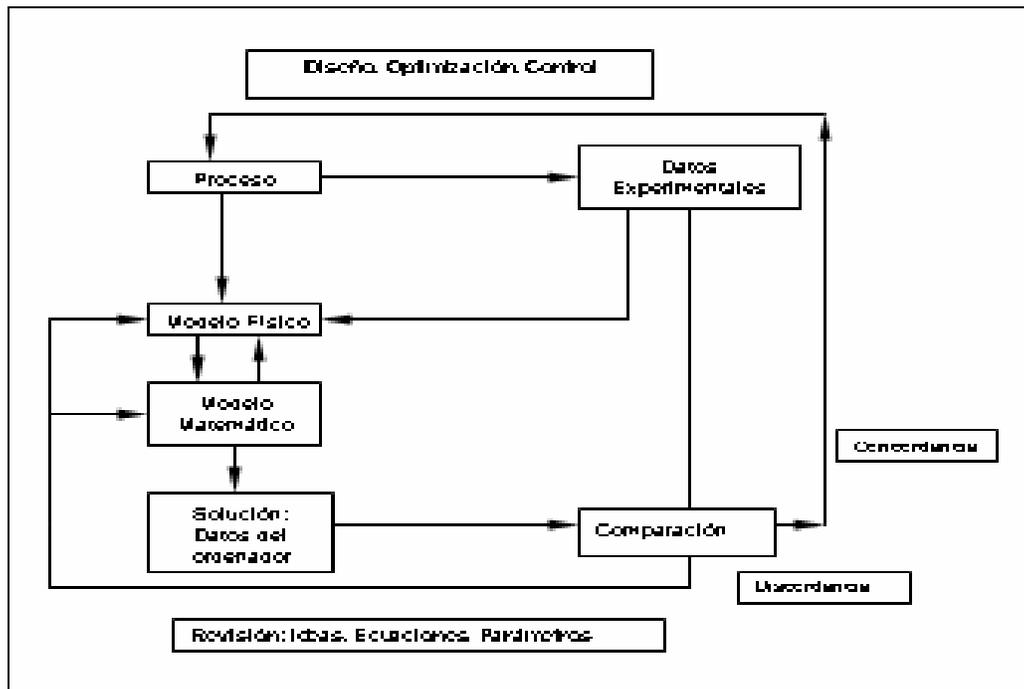
Aspectos importantes en el desarrollo de un "modelo" son:

- Formulación de ecuaciones del balance de materia y energía.

- Ecuaciones cinéticas apropiadas para las reacciones químicas.
- Velocidades de transferencia de masa y calor que representan los cambios de las propiedades del sistema, equilibrio de fase, y aplicación de control.

El procedimiento general para modelizar será el siguiente:

Figura 2. Procedimiento general para modelizar



Fuente: Enciclopedia Encarta, Microsoft Corporation ®.

Un uso importante del "modelo" del proceso es el análisis de datos experimentales, utilizando este hecho para caracterizar el proceso asignando valores numéricos a variables importantes del proceso.

La aplicación combinada de las aproximaciones de modelización y simulación conllevan las siguientes ventajas:

- La modelización mejora el entendimiento.
- Los "modelos" ayudan en el diseño experimental.
- Los "modelos" pueden ser utilizados de forma predictiva para el diseño y control.
- Los "modelos" pueden ser utilizados en la educación y entrenamiento.
- Los "modelos" sirven para la optimización del proceso.
- Viscosidad. Propiedad de un fluido que tiende a oponerse a su flujo cuando se le aplica una fuerza. Los fluidos de alta viscosidad presentan una cierta resistencia a fluir; los fluidos de baja viscosidad fluyen con facilidad. La fuerza con la que una capa de fluido en movimiento arrastra consigo a las capas adyacentes de fluido determina su viscosidad, que se mide con un recipiente (viscosímetro) que tiene un orificio de tamaño conocido en el fondo. La velocidad con la que el fluido sale por el orificio es una medida de su viscosidad.
- El Viscosímetro De Ostwald. Ha existido por mas de 100 años y el reogoniómetro de Weissenberg se conoce desde 1947 con pequeñas variaciones por Meissner en 1964 que solo afectan mediciones de fuerzas transientes. Es difícil deducir algo de este tipo de mediciones muy precisas a no ser por el cuerpo teórico que este curso trata de proporcionar.

Se toma como punto de partida del estudio de la reología la explicación molecular de los fenómenos de viscosidad, conductividad térmica y difusión de fluidos simples. Se introduce luego el concepto del fluido viscoelástico lineal como el modelo más simple

del flujo de un polímero. Se aplica el modelo a la mayor cantidad posible de tipos de deformación.

- Velocidad. Variación de la posición de un cuerpo por unidad de tiempo. La velocidad es un vector, es decir, tiene módulo (magnitud), dirección y sentido. La magnitud de la velocidad, conocida también como rapidez o celeridad, se suele expresar como distancia recorrida por unidad de tiempo (normalmente, una hora o un segundo); se expresa, por ejemplo, en kilómetros por hora o metros por segundo. Cuando la velocidad es uniforme constante se puede determinar sencillamente dividiendo la distancia recorrida entre el tiempo empleado. Cuando un objeto está acelerado, su vector velocidad cambia a lo largo del tiempo. La aceleración puede consistir en un cambio de dirección del vector velocidad, un cambio de su magnitud o ambas cosas.

La relación entre esfuerzos mecánicos y deformaciones, así como velocidades de deformación, esta dada generalmente por ecuaciones constitutivas. Dichas ecuaciones constitutivas pueden estar basadas en teorías moleculares o en la mecánica del medio continuo.

En general se considera a los polímeros fundidos y a las soluciones poliméricas como fluidos no Newtonianos, ya que no siguen la ley de Newton de los fluidos viscosos, la cual esta dada por:

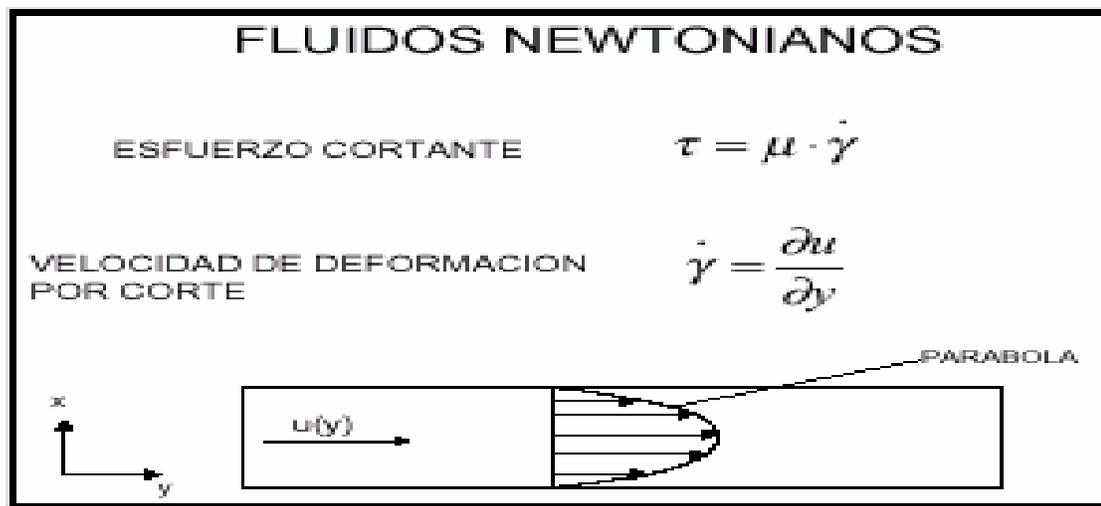
$$\tau = m \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

Donde:

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2)$$

Es la velocidad de deformación por corte (para un flujo unidireccional). τ es el esfuerzo de corte en el fluido, u es la velocidad del fluido y μ es la viscosidad del fluido. La siguiente figura indica algunos parámetros de flujo para fluidos Newtonianos.

Figura 3. Parámetros de flujo para fluidos Newtonianos.



Fuente: Tomado de MOTT, Robert. Mecánica de fluidos aplicada. Cuarta edición. Méjico: Editorial Prentice Hall, 1996.

- Temperatura. Propiedad de los sistemas que determina si están en equilibrio térmico. El concepto de temperatura se deriva de la idea de medir el calor o frialdad relativos y de la observación de que el suministro de calor a un cuerpo conlleva un aumento de su temperatura mientras no se produzca la fusión o ebullición. En el caso de dos cuerpos con temperaturas diferentes, el calor fluye del más caliente al más frío hasta que sus temperaturas sean idénticas y se alcance el equilibrio térmico

(Véase Transferencia de calor). Por tanto, los términos de temperatura y calor, aunque relacionados entre sí, se refieren a conceptos diferentes: la temperatura es una propiedad de un cuerpo y el calor es un flujo de energía entre dos cuerpos a diferentes temperaturas.

Los cambios de temperatura tienen que medirse a partir de otros cambios en las propiedades de una sustancia. Por ejemplo, el termómetro de mercurio convencional mide la dilatación de una columna de mercurio en un capilar de vidrio, ya que el cambio de longitud de la columna está relacionado con el cambio de temperatura. Si se suministra calor a un gas ideal contenido en un recipiente de volumen constante, la presión aumenta, y el cambio de temperatura puede determinarse a partir del cambio en la presión según la ley de Gay-Lussac, siempre que la temperatura se exprese en la escala absoluta.

Una de las primeras escalas de temperatura, todavía empleada en los países anglosajones, fue diseñada por el físico alemán Gabriel Daniel Fahrenheit. Según esta escala, a la presión atmosférica normal, el punto de solidificación del agua (y de fusión del hielo) es de 32 °F, y su punto de ebullición es de 212 °F. La escala centígrada o Celsius, ideada por el astrónomo sueco Anders Celsius y utilizada en casi todo el mundo, asigna un valor de 0 °C al punto de congelación del agua y de 100 °C a su punto de fusión. En ciencia, la escala más empleada es la escala absoluta o Kelvin, inventada por el matemático y físico británico William Thomson, lord Kelvin. En esta escala, el cero absoluto, que está situado en -273,15 °C,

corresponde a 0 K, y una diferencia de un kelvin equivale a una diferencia de un grado en la escala centígrada.

- Anemometría Láser. La medida de la velocidad de un fluido y otras propiedades asociadas tales como la turbulencia, temperatura etc. ha sido siempre un factor fundamental en todas aquellas investigaciones relacionadas con la mecánica de fluidos. Las técnicas empleadas suelen clasificarse según sea el enfoque o procedimiento de la medida.

Así, se puede medir la velocidad en varios puntos del campo en función del tiempo o, por el contrario, se puede medir el campo de flujo en un instante temporal y repetir dicha medición en sucesivos instantes. El grupo Álava Ingenieros, a través de su representada *TSI Láser Diagnostics*, presenta 3 diferentes técnicas de medida tecnológicamente muy avanzadas

- *Velocimetría por Láser Doppler (LDV)*. La *Velocimetría por láser Doppler* es una técnica ampliamente probada que mide la velocidad de un fluido con precisión y de un modo no invasivo.

La luz del láser ilumina el fluido, y la luz reflejada de las partículas sembradas en el flujo es recogida y procesada. En la práctica, un sólo haz del láser es dividido en dos haces de igual intensidad que se enfocan en un punto común en el campo de flujo.

En el punto donde los haces se cortan se forma un modelo de interferencia, definiendo el volumen de medición. Las partículas que se mueven a través del volumen de medición dispersan luz de intensidad variable que es recolectada con un fotodetector.

La frecuencia de salida resultante del fotodetector está directamente relacionada con la velocidad de la partícula.

Si se dirigen haces adicionales de láser con longitudes de onda diferentes (colores) hacia el mismo volumen de medición pueden determinarse las tres componentes de la velocidad simultáneamente.

La naturaleza no invasiva del LDV hace que sea una técnica muy atractiva para la medición de velocidades en cualquier tipo de fluido. Puesto que no se introducen sondas dentro del flujo, está especialmente recomendado para la medida en flujos complejos y ambientes hostiles. Puesto que su principio no depende de las propiedades del fluido, se pueden realizar mediciones con LDV en una enorme variedad de fluidos o mezcla de fluidos.

1.10.3 Variables. Para analizar y entender la reología de los materiales poliméricos es necesario revisar algunas nociones básicas:

- Esfuerzo: Es la relación entre la fuerza y área de aplicación de la misma.
- Deformación: Puede definirse en su forma más simple, como el cambio de dimensión de un elemento, respecto a su dimensión inicial.
- Velocidad de deformación: Es la rapidez con que se produce la deformación, y puede expresarse como la derivada de la función (tensor) de deformación. Dependiendo del tipo de flujo puede ser de corte o extensional.

- Tipos de flujo: Los tipos de fuerza actuando sobre el elemento de fluido, que pueden ser normales o de corte, determinan el tipo de flujo, el cual puede ser extensional (elongacional) o por corte respectivamente.
- Viscosidad: Es la relación entre el esfuerzo y la velocidad de deformación. Dependiendo del tipo de flujo, la viscosidad puede ser extensional o por corte.

1.10.4 Hipótesis. La Determinación del comportamiento hidrodinámico de un polímero fundido es posible mediante un modelo experimental, que permita la obtención de propiedades como viscosidad, velocidad, esfuerzos.

1.11 ESTRATEGIA OPERATIVA. ADMINISTRACIÓN Y CONTROL DE LA INVESTIGACIÓN

1.11.1 Cronograma de actividades

Tabla 1. Cronograma de actividades

Actividades	Meses y Semanas																															
	1° Mes				2° Mes				3° Mes				4° Mes				5° Mes				6° Mes				7° Mes							
Estudio de modelos experimentales en polímeros fundidos e instrumentos de medición.	█	█	█	█																												
Diseño de modelo experimental e instalaciones de instrumentos de medición.					█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█																
Toma de datos del modelo experimental.																	█	█	█	█												
Validez de Datos.																					█	█	█	█								
Informe Final.									█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█

1.11.2 Presupuesto

Rubros	Costos (\$)
Recolección de Información:	
Motor reductor	\$250.000
Reactor de Polimerización	\$ 500.000
Libros de análisis	\$ 100.000
Instrumentos de medición	\$ 1000.000
Fotocopias	\$25.000
Consumo Internet	\$20.000
Transporte	\$ 100000
Informe Final	
Papelería	
Paquetes de Hojas Tamaño Carta	\$ 50.000
Impresión	
Dos Cartuchos Negros Impresora Hewlett-Packard	\$100.000
Gastos varios	\$150000
Total	\$ 2. 295.000

1.11.3 Descripción de los equipos.

- Motor reductor: 1Hp / 1750RPM
- Computadoras: Intel Pentium 4 de 1.6 Gigahertz.
- Software: MATLAB

2. TEORÍA DE LOS AGITADORES

2.1 AGITACIÓN DE LÍQUIDOS

El éxito de muchos procesos depende de una eficaz agitación de los fluidos que intervienen. La agitación se refiere al movimiento inducido de un material de una forma determinada, generalmente, circulatoria, y dentro de algún tipo de recipiente.

2.2 FINES DE LA AGITACIÓN

Los líquidos se agitan para lograr cierto número de fines en un proceso o en una determinada etapa del mismo. Estos fines pueden ser:

- Poner en suspensión partículas sólidas.
- Agitar líquidos miscibles, como por ejemplo, metanol y agua.
- Dispensar un gas en un seno de un líquido en forma de pequeñas burbujas.
- Dispensar un líquido en otro no miscible con él, para formar emulsiones o suspensiones de gotas pequeñas.
- Favorecer la transmisión de calor entre un líquido y un serpentín o entre un líquido y una camisa.

Con frecuencia un agitador cumple diversos fines simultáneamente, como ocurre, por ejemplo, en la hidrogenación catalítica de un líquido. En un tanque de hidrogenación,

el gas es dispersado a través de un líquido en el cual están en suspensión las partículas sólidas del catalizador, y en donde al mismo tiempo se elimina el calor producido por la reacción con la ayuda de un serpentín o de una camisa de refrigeración.

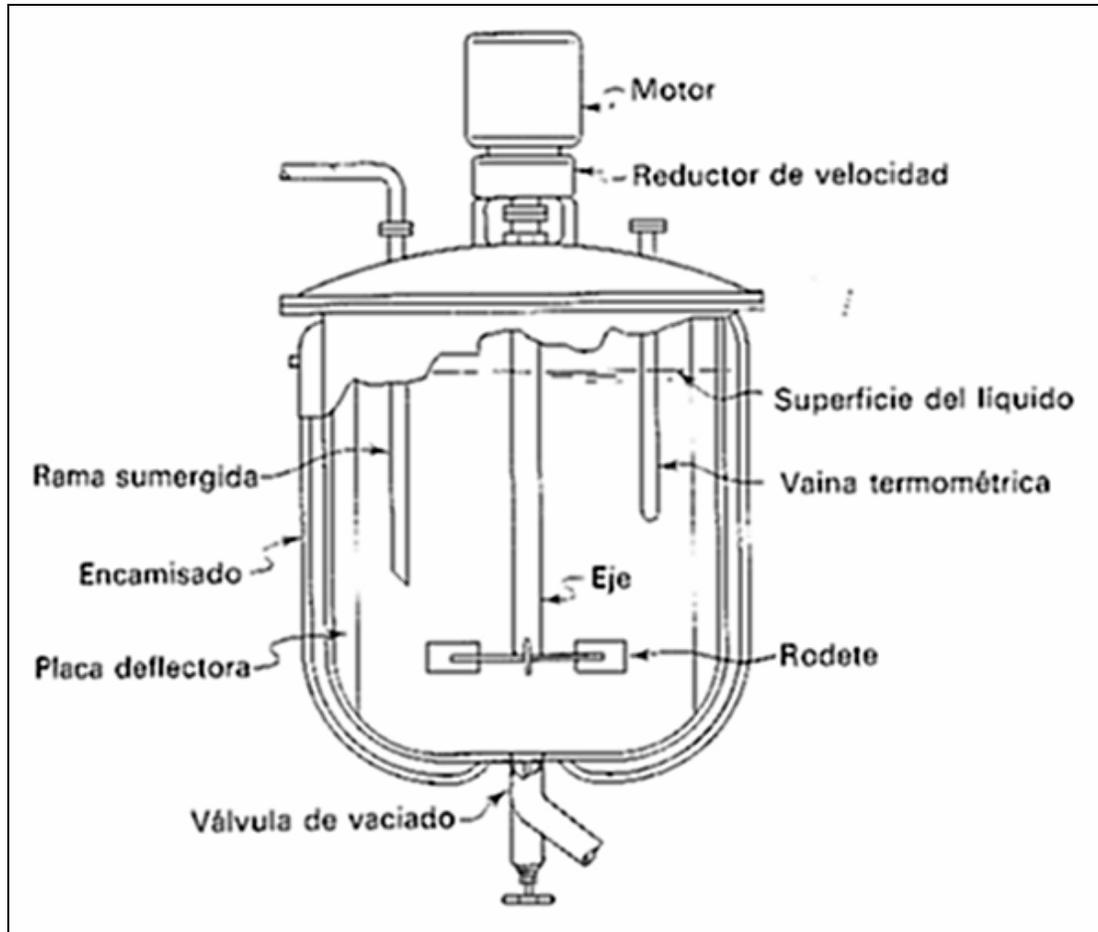
2.3 APARATOS DE AGITACIÓN

Los lugares más corriente en donde se agitan los líquidos son los tanques o recipientes, los cuales son generalmente cilíndricos y poseen un eje vertical. La parte superior de un tanque puede estar abierta o cerrada. Las proporciones del tanque varían ampliamente dependiendo de la naturaleza del problema de agitación que se pretende resolver. Un diseño típico, representado en la figura 1, se aplica en muchos casos. Se observa que el fondo del tanque no es plano sino redondeado, lo cual tiene por objeto eliminar los bordes rectos o las regiones en las cuales no penetrarían las corrientes de fluido. La altura del líquido es aproximadamente igual al diámetro del tanque. Sobre un eje suspendido desde la parte superior va montado un agitador. El eje es accionado por un motor conectado, a veces, directamente al mismo eje, pero con mayor frecuencia lo es a través de una caja de engranajes reductores. Generalmente se incluyen también las conducciones de entrada y salida, los serpentines, las camisas y las oquedades dispuestas para los termómetros u otros instrumentos de medida de temperatura.

El agitador crea un cierto número de tipo de flujo dentro del sistema, dando lugar a que el líquido circule por todo el recipiente y vuelva de vez en cuando al agitador.

Los tipos de flujos en los tanques los estudiaremos más adelante.

Figura 4. Tanque Agitado Típico.



Fuente: Tomado de MICHELL, B. J. Y MILLAR, S.A.: AJChe J., 8:262 (1962).

2.4. AGITADORES

Los agitadores se divide en dos clases: (1) Los que generan corrientes paralelas al eje del agitador, y (2) los que dan origen a corrientes en dirección tangencial o radial. Los primeros se llaman agitadores de flujo axial y los segundos, agitadores de flujo radial.

Los tres tipos principales de agitadores son: (1) De hélice, (2) de paletas, y (3) de turbina. Cada uno de estos tipos de agitadores comprende muchas variaciones y subtítulos que no se consideraran en el presente trabajo de investigación. En algunos casos son útiles también agitadores especiales, pero con los tres tipos antes citados se resuelven alrededor del 95% de los problemas de agitación de líquidos.

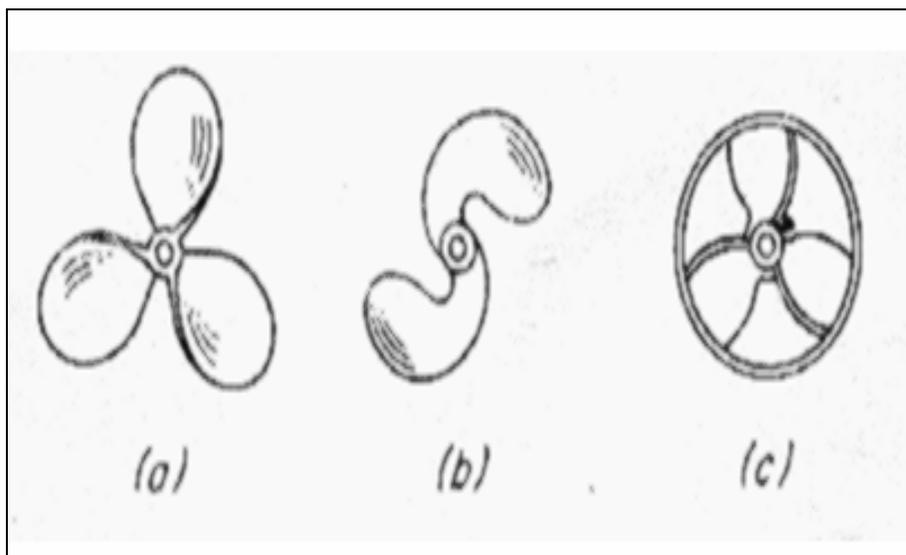
2.4.1. Agitadores de Hélice. Un agitador de hélice es un agitador de flujo axial que opera con velocidad elevada y se emplea para líquidos poco viscosos. Los agitadores de hélice más pequeños giran a toda la velocidad del motor, unas 1150 ó 1750 rpm; los mayores giran a velocidades de entre 400 a 800 rpm. Las corrientes de flujo que parten del agitador se mueven a través del líquido en una dirección determinada hasta que son desviadas por el fondo a las paredes del tanque. La columna de remolinos de elevada turbulencia del líquido que parte del agitador arrastra en su movimiento al líquido estancado, generando un efecto considerablemente mayor que el que se obtendría mediante una columna equivalente creada por una boquilla estacionaria. Las palas de la hélice cortan o friccionan vigorosamente el líquido. Debido a la persistencia de las corrientes de flujo, los agitadores de hélice son eficaces para tanques de gran

tamaño. Para tanques extraordinariamente grandes en orden de los 1500 m³ se ha utilizado agitadores de múltiples hélices con entradas laterales al tanque.

Un Agitador Giratorio, realiza un movimiento de hélice dentro del fluido y si no hubiese deslizamiento entre el líquido y el agitador en una revolución completa se movería el líquido longitudinalmente a una distancia determinada dependiendo del ángulo de inclinación de las palas del agitador. La relación existente entre esta distancia y el diámetro del agitador se conoce con el nombre de paso de la hélice. Un agitador con un paso de la hélice de 1.0 se dice que tiene un paso cuadrado.

En la Figura 5 se representan varios tipos de agitadores de hélice. Los más corrientes son los agitadores marinos de hélice de tres palas, los cuales tienen un paso cuadrado para fines especiales.

Figura 5. Hélices de mezclas: (a) Normal de tres palas. (b) De Cuchilla. (c) Protegida.



Fuente: Tomado de MICHELL, B. J. Y MILLAR, S.A.: AJChe J., 8:262 (1962).

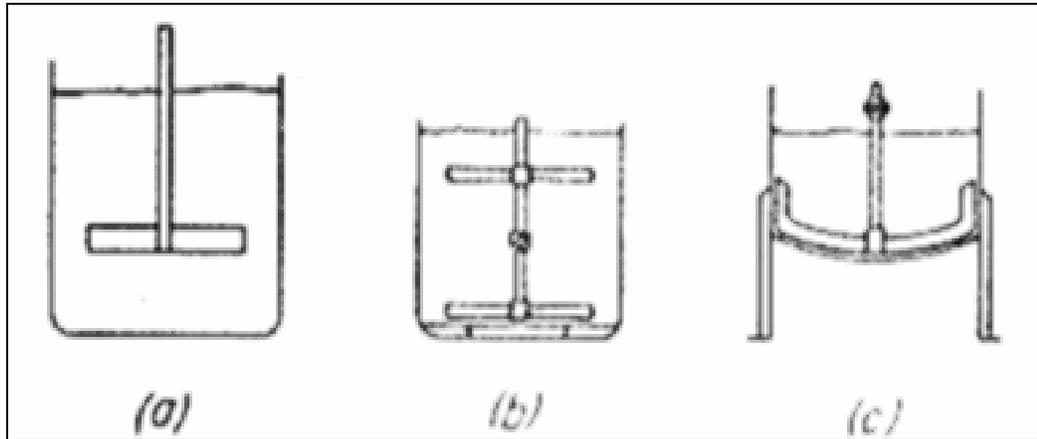
También, se emplean hélices de cuatro palas, dentadas y de otros tipos.

El diámetro de los agitadores de hélice raramente es mayor de 45 centímetros independientemente del tamaño del tanque. En tanques de gran altura pueden disponerse de dos o más hélice sobre el mismo eje, las cuales mueven el líquido, generalmente, en la misma dirección. A veces dos agitadores operan en sentido opuesto o en “push-pull”, creando una zona de turbulencia en el espacio comprendido entre ellos.

2.4.2. Agitadores de paletas. En la figura 6 se representan distintos tipos de agitadores de paletas. Para solucionar problemas sencillos, un agitador eficaz está formado por una paleta plana que gira sobre un eje vertical. Son corrientes los agitadores formados por dos o tres paletas.

A veces las paletas están inclinadas, pero lo más frecuentes es que estén en posición vertical. Las paletas giran a velocidades bajas o moderadas en el centro del tanque, impulsando el fluido de manera radial y tangencial, sin que exista movimiento vertical respecto al agitador, al menos que las paletas estén inclinadas. Las corrientes de líquido originadas se dirigen hacia la pared del tanque y después siguen hacia arriba o hacia abajo. En los tanques de gran altura, se disponen de varias paletas unas sobre otras acopladas en el mismo eje.

Figura 6. Agitadores De Paletas: (a) Paletas Planas. (b) Paletas Inclínadas. (c) Agitador de ancla.



Fuente: Tomado de PERRY, J.H. (ed). "Chemical Engineers' Handbook", 5 edición, pp. 19-8ss, McGraw-Hill, New York, 1973.

En el diseño que se presenta en la figura 6c, las paletas se adaptan a la forma cóncava o semiesférica del tanque de manera que en su movimiento rascan la superficie o pasan sobre ella con una holgura muy pequeña. Un agitador de este tipo se conoce como "agitador de ancla". Los agitadores de ancla son útiles cuando se desea evitar el depósito de sólidos sobre una superficie de transmisión de calor, como ocurre en un tanque encamisado, pero no son muy buenos mezcladores. Generalmente trabajan conjuntamente con un agitador de paletas o de otro tipo, el cual se mueve con una velocidad elevada y gira normalmente en sentido opuesto.

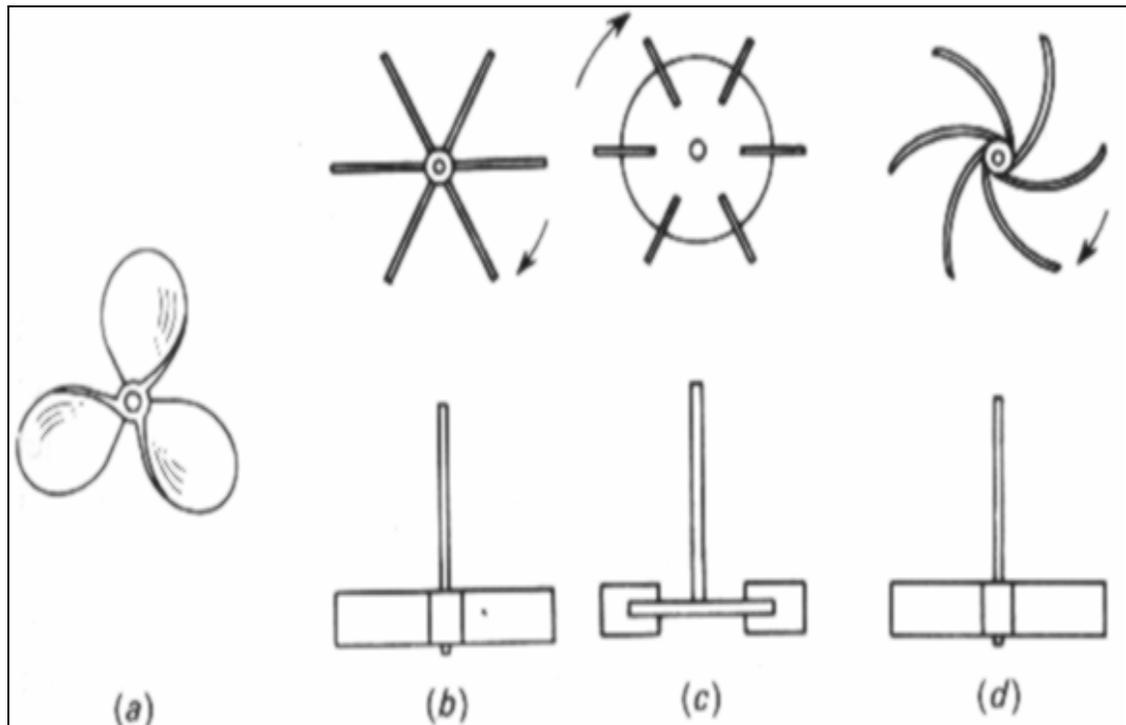
Los agitadores industriales de paletas giran a velocidades comprendidas entre las 20 y las 150 rpm. La longitud del rodete de un agitador de paletas es del orden del

50 al 80% del diámetro interior del tanque. La anchura de la paleta es de una sexta a una décima parte de la longitud del tanque. A velocidades muy bajas, un agitador de paletas produce una agitación suave en un tanque, pero a velocidades altas se hace necesario el uso de placas deflectoras o de cortacorrientes para evitar que el líquido se mueva como un remolino de alta velocidad pero de poco efecto de mezcla.

2.4.3. Agitadores de Turbina. En la figura 7 se representan algunos de los múltiples agitadores de turbina. La mayor parte de ellos se asemeja a agitadores múltiples y de cortas paletas, que giran con velocidades elevadas sobre un eje que va montado centralmente en el tanque. Las paletas pueden ser rectas o curvas, inclinadas o verticales. El rodete puede ser abierto, semicerrado o cerrado. El diámetro del rodete es menor que en el caso de los agitadores de paletas, siendo del orden del 30 al 50% del diámetro del tanque.

Los agitadores de turbina son eficaces para unos amplios intervalos de viscosidades; en líquidos poco viscosos, producen corrientes intensas que se extienden por todo el tanque y destruyen las masas de líquidos estancados. En las proximidades del rodete existen zonas de corrientes rápidas, de alta turbulencia e intensos esfuerzos cortantes. Las corrientes principales son radiales y tangenciales. Las componentes tangenciales dan lugar a vórtices y torbellinos que se deben evitar por medio de placas deflectoras o de un anillo difusor a fin de que el rodete sea lo más eficaz.

Figura 7. Rodetes De Agitadores De Turbinas. (a) Abierto De Palas Verticales. (b) De Disco Con Alabes. (c) De Paletas Verticales Curvas. (d) Cerrado De Paletas Curvas Con Un Anillo Difusor.



Fuente: Tomado de MICHELL, B. J. Y MILLAR, S.A.: AJChe J., 8:262 (1962).

El agitador de turbina semiabierto, conocido como agitador de disco con aletas que se presenta en la figura 7b, se emplea para disolver un gas en un líquido. El gas entra por la parte inferior del eje del rodete; las aletas lanzan burbujas grandes y las rompen en muchas pequeñas, con lo cual se aumenta grandemente el área de interfase entre el gas y el líquido. A veces se dirige el gas hacia abajo del rodete, aunque resulta menos eficaz que tomarlo desde abajo; o puede formarse intencionalmente un vértice para dirigir el gas desde el espacio situado por encima del líquido hasta la zona de mezcla.

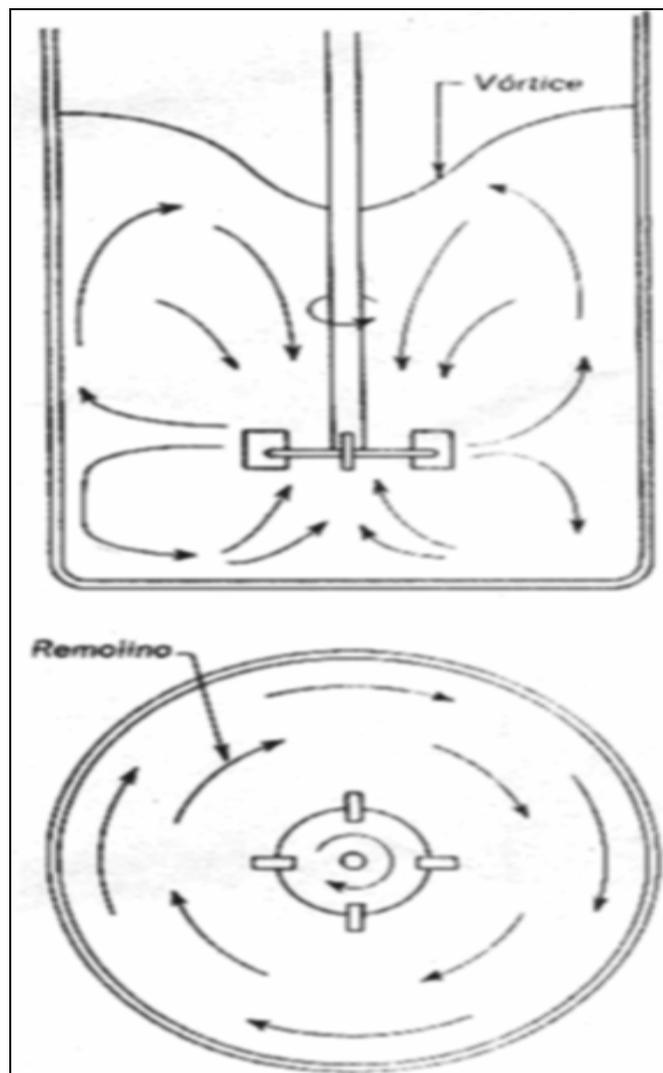
2.5. TIPOS DE FLUJOS EN TANQUES AGITADORES

El tipo de flujo que se produce en un tanque agitador depende del tipo de rodete, de las características del fluido, del tamaño y de la proporción del tanque, de las placas deflectoras y del agitador. La velocidad del fluido en un punto del tanque tiene tres componentes de velocidad de un punto a otro. La primera componente de velocidad es radial y actúa en dirección perpendicular al eje del rodete. La segunda es longitudinal y actúa en dirección paralela al eje. La tercera es tangencial o rotacional y actúa en dirección tangencial a la trayectoria circular al rodete. Para el caso de la corriente de un eje vertical, las componentes radiales y tangenciales están en plano horizontal y la componente longitudinal es vertical. Las componentes radial y longitudinal dan lugar al flujo necesario para que se produzca la mezcla.

Cuando el eje es vertical y está dispuesto en el centro del tanque, la componente tangencial de la velocidad es perjudicial para la mezcla. El flujo tangencial sigue una trayectoria circular alrededor del eje y, según se representa en la figura 8, crea un vórtice en la superficie del líquido que debido a la circulación en flujo laminar, da lugar a una estratificación permanente en diferentes niveles de sustancias sin mezclar, sin que exista flujo longitudinal de un nivel a otro. Si están presentes partículas sólidas, las corrientes circulatorias tienden a lanzar las partículas contra la pared del tanque debido a que las fuerzas centrífugas desde donde caen, acumulándose en la parte central del fondo del tanque.

Por consiguiente, en vez de mezcla, se produce la acción contraria, o sea, la concentración.

Figura 8. Formación de los vórtices y tipos de flujos en un tanque agitado.



Fuente: Tomado de PERRY, J.H. (ed). "Chemical Engineers' Handbook", 5 edición, pp. 19-8ss, McGraw-Hill, New York, 1973.

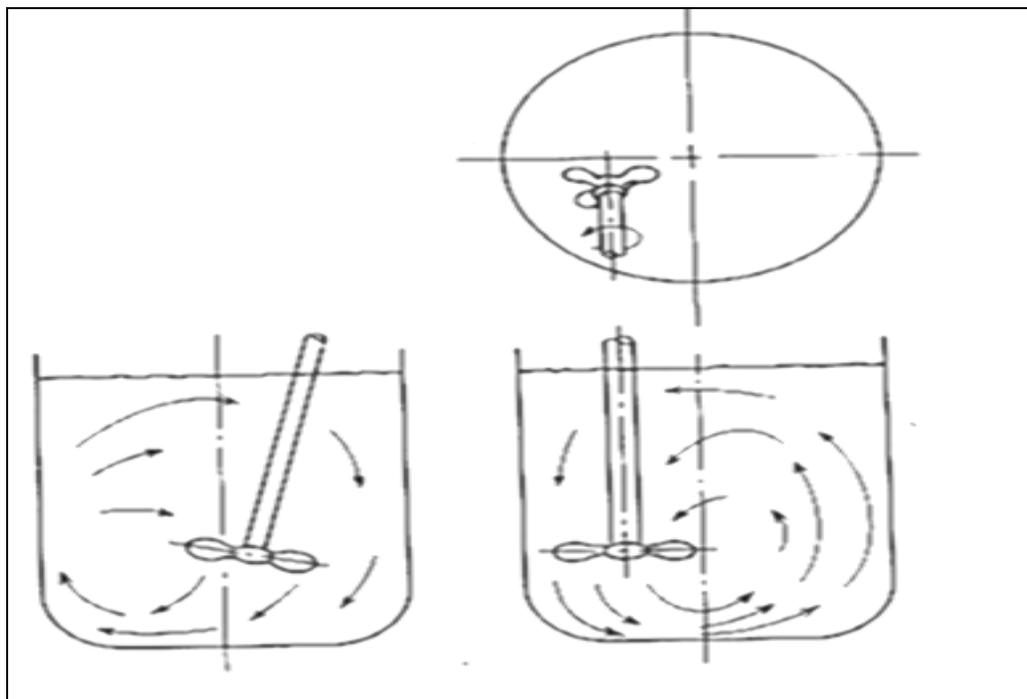
En el flujo circulatorio el líquido fluye según la dirección del movimiento de las palas del rodete y por consiguiente, disminuye la velocidad relativa que existe entre las palas y el líquido, con lo cual se limita la potencia que puede ser absorbida por el líquido. En un tanque sin placas deflectoras, el flujo circulatorio es inducido por todos los tipos de

rodete, tanto si el flujo es axial como radial. En efecto si los remolinos son intensos, el tipo de flujo dentro del tanque es esencialmente el mismo, independientemente del diseño del rodete. Para velocidades de giro de rodetes elevadas, la profundidad del vértice puede ser tan grande que llegue al rodete mismo, dando lugar que en el líquido se introduzca el gas que está encima de él, lo cual normalmente debe evitarse.

2.6. FORMAS DE EVITAR LOS REMOLINOS

El flujo circulatorio y los remolinos pueden evitarse por uno de los tres métodos siguientes.

Figura 9. Agitador no centrado.

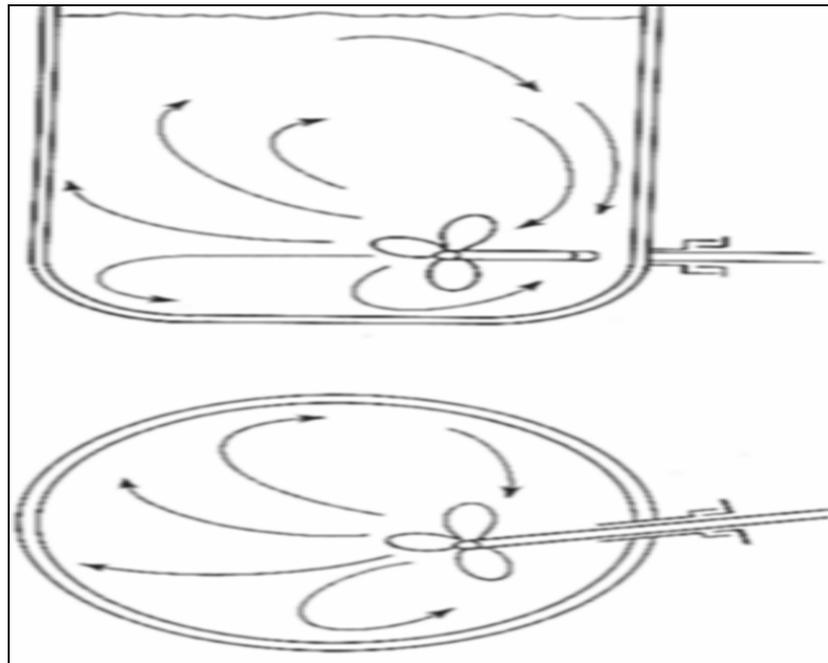


Fuente: Tomado de MICHELL, B. J. Y MILLAR, S.A.: AJChe J., 8:262 (1962).

En tanques de pequeño tamaño se dispone el rodete separado del centro del tanque, según indica la figura 9, el eje se mueve así alejado de la línea que pasa por centro del tanque, inclinándose después según un plano perpendicular a la dirección del movimiento. En tanques de mayor tamaño, el agitador debe montarse en la parte lateral del tanque con el eje en el plano horizontal, pero formando un cierto ángulo con el radio, según se indica en la figura 10.

En los tanques de gran tamaño con agitadores verticales, el método más conveniente de reducir los remolinos es instalar placas deflectoras que impidan el flujo rotacional sin afectar el flujo radial y el flujo longitudinal.

Figura 10. Agitador no centrado lateral.



Fuente: Tomado de MICHELL, B. J. Y MILLAR, S.A.: AJChe J., 8:262 (1962).

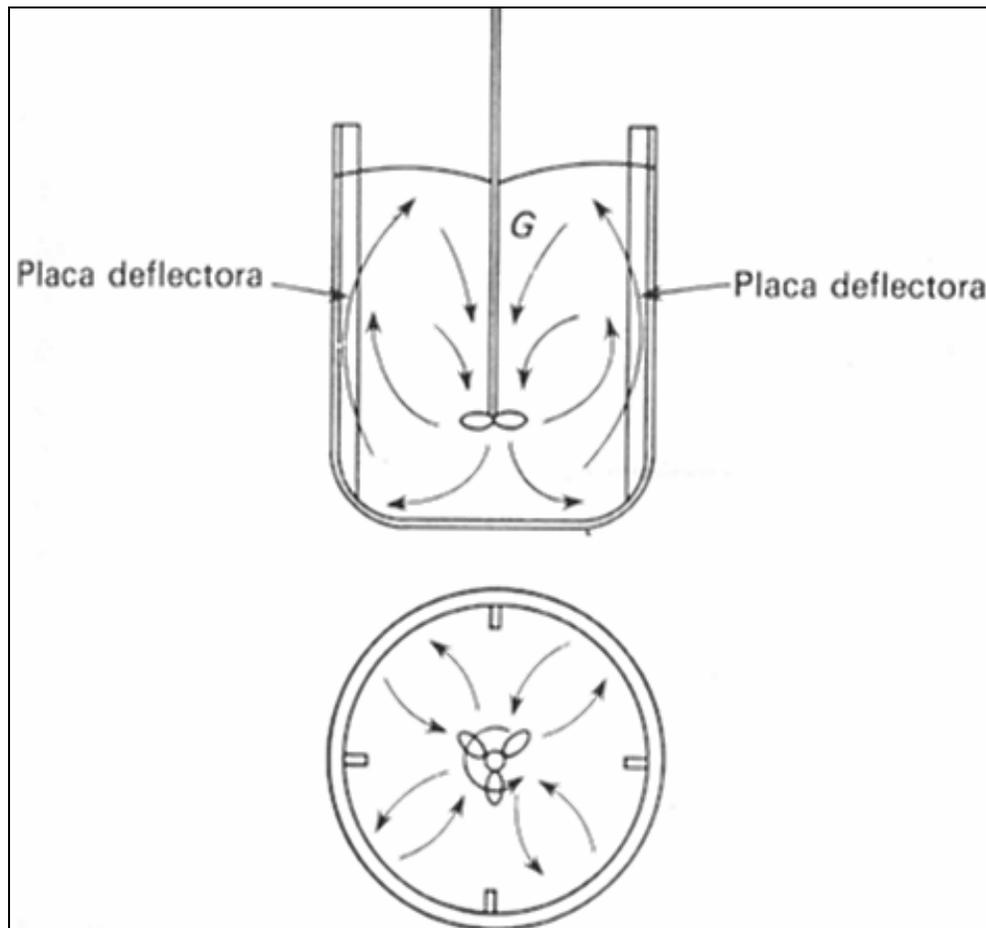
Un método sencillo y eficaz de destruir los remolinos se consigue instalando placas verticales perpendiculares a la pared del tanque. En la figura 11 se representan placas deflectoras de este tipo, y el tipo de flujo que da lugar. Excepto en los tanques muy grandes, son suficientes cuatro placas deflectoras para evitar el remolino y la formación de vórtice. Para agitadores de turbina, no es preciso que la anchura de la placa deflectora sea mayor que la doceava parte del diámetro del tanque; para agitadores de hélice basta con un octavo. Cuando el rodete que entra al tanque lateralmente está inclinado o desplazado del centro, no son necesarias las placas deflectoras.

Para eliminar los remolinos en los agitadores de turbina pueden emplearse rodetes cerrados y anillos difusores, en lugar de placas deflectoras, según se indica en la figura 4d; su principal efecto es aquí aumentar la fricción y reducir la circulación. Los anillos difusores tienden a evitar también las corrientes que llegan a los rincones lejanos del tanque. Los anillos difusores son difíciles de instalar y mantener. Son útiles cuando se desean turbulencia y esfuerzos cortantes especialmente intensos en la descarga del rodete.

Una vez eliminado los remolinos, el tipo de flujo específico dentro del tanque depende del tipo de rodete. Los agitadores de hélice impulsan el líquido hacia el fondo del tanque, donde la corriente se extiende radialmente en todas las direcciones hacia las paredes, fluyen sobre las mismas hacia arriba y retorna hacia la sección de la hélice desde la parte superior. Esta forma de flujo se representa en la figura 11, los agitadores de hélice se emplean cuando se desean intensas corrientes verticales, por

ejemplo, cuando se han de mantener en suspensión partículas sólidas pesadas. Ordinariamente no se emplean cuando la viscosidad del líquido es superior a los 5.000 centipoises.

Figura 11. Tipo de flujo en un tanque con placas deflectoras y un agitador de hélice montado en el centro.



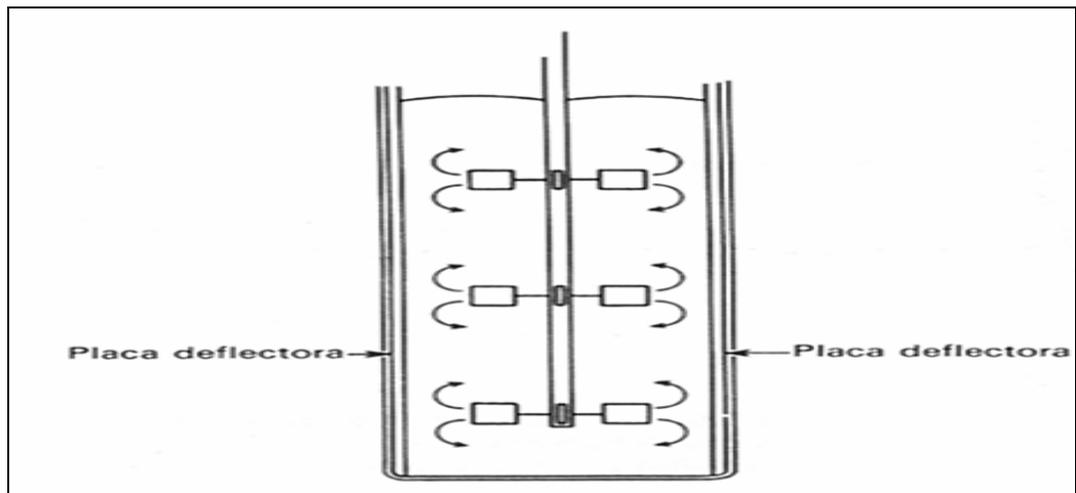
Fuente: Tomado de MORRISON, P. P.: OLIN, H. RAPPE, G.: Chemical Engineering Research Report, Cornell University, Junio 1972 (No publicado).

Los agitadores de paletas producen un flujo radial intenso en el plano próximo a las palas, pero prácticamente no dan lugar a corrientes verticales. Esta es la limitación

principal de los agitadores de paletas y por consiguiente, estos agitadores no son eficaces para poner sólidos en suspensión.

Los agitadores de turbina impulsan al líquido radialmente contra las paredes laterales del tanque y allí la corriente se divide, una parte de ella fluye hacia abajo hasta el fondo del tanque y vuelve al centro del rodete por la parte inferior, la otra parte fluye hacia la superficie del líquido y regresa al rodete por la parte superior. Según se indica en la figura 8, se producen dos corrientes de circulación separadas. Los agitadores de turbina son especialmente eficaces en producir corrientes radiales pero inducen al mismo tiempo flujos verticales especialmente cuando se dispone placas deflectoras. Dan excelentes resultados en la mezcla de líquidos que tiene aproximadamente la misma densidad relativa.

Figura 12. Turbinas múltiples en un tanque de gran altura.



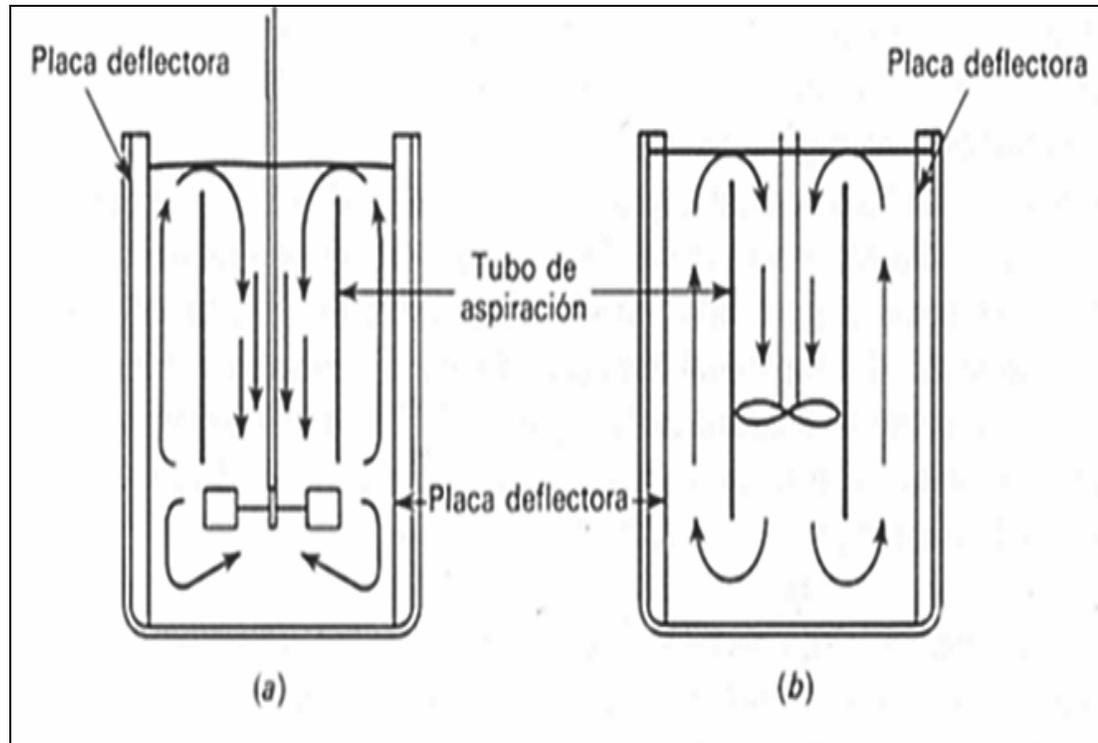
Fuente: Tomado de PERRY, J.H. (ed). "Chemical Engineers' Handbook", 5 edición, pp. 19-8ss, McGraw-Hill, New York, 1973.

En un tanque cilíndrico vertical la altura del líquido debe ser igual o algo mayor que el diámetro del tanque. Si se desea una altura mayor, se montan dos rodetes sobre el mismo eje actuando cada uno de ellos como un mezclador independiente. Como se indica en la figura 12, Cada rodete produce dos corrientes de circulación. El rodete inferior, bien sea de turbina o de hélice, se monta a una distancia aproximadamente igual al diámetro del rodete sobre el fondo del tanque.

2.7. TUBOS DE ASPIRACIÓN

El flujo de retorno a un rodete de cualquier tipo llega al mismo procedente de todas las direcciones siempre que el líquido no este sometido al control de superficies sólidas. El flujo hacia o desde la hélice es esencialmente igual al flujo del aire hacia o desde un ventilador instalado en una habitación. En la mayor parte de las aplicaciones de los mezcladores de hélice este tipo de flujo no es un inconveniente, pero cuando se desean controlar dirección de flujo hacia la succión del rodete se emplean tubos aspiradores según indica la figura 13; estos dispositivos pueden ser útiles cuando se desean intensos esfuerzos cortantes en el rodete, como ocurre en la obtención de determinadas emulsiones o cuando se quieren dispersar en el seno de un líquido partículas sólidas que tienden a flotar en el mismo.

Figura 13. Tubos de aspiración en un tanque agitado: (a) Agitador de turbina. (b) agitador de hélice.



Fuente: Tomado de GRAY, J. B.: en V. W. Uhl y J. B. Gray (eds.). "Mixing: Theory and Practice", Vol. I, Academic, New York, 1969; (a) pp. 181-184, (b) pp. 207-208.

Los tubos aspiradores para agitadores de hélice se disponen alrededor del rodete, según indica la figura 13.

Los tubos de aspiración aumentan la fricción del fluido y para una potencia suministrada, disminuyen la velocidad del flujo de forma que no se utilizan a menos que sean necesarios.

2.8. VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN

Se denomina velocidad de circulación o capacidad de bombeo del rodete, al volumen del fluido puesto en movimiento por el rodete en la unidad de tiempo. Para que el proceso de agitación dentro del tanque sea eficaz, independientemente de la naturaleza del problema, la velocidad volumétrica del fluido ha de ser suficiente para renovar el volumen total del mezclador en un tiempo razonable. Por otra parte la velocidad de la corriente que abandona al rodete ha de ser lo suficientemente elevada para que su influencia llegue a las partes más alejada del tanque, ya que de lo contrario las sustancias que ocupan esas partes no llegaran a mezclarse. La corriente que abandona el rodete transporta una cantidad definida de energía cinética y esta energía se disipa por fricción debido a los esfuerzos cortantes a medida que la corriente fluye a través de la masa del líquido. Si la energía cinética es demasiado pequeña la corriente no llega alcanzar los rincones más alejado del tanque, por consiguiente es necesario que la velocidad del fluido sea tan que proporcione una energía cinética superior a cierto valor mínimo.

La velocidad del flujo de un agitador de turbina o de paletas de un tamaño y forma determinados y que opera dentro de un tanque que contiene un líquido determinado, es proporcional a la magnitud nD_a^2 siendo n la velocidad de giro del agitador en rpm y D_a diámetro del rodete. Para agitadores de hélice, la velocidad del flujo es proporcional a nD_a^3 .

En operaciones de mezcla, la velocidad de circulación no es el único factor importante, ya que es posible la existencia de corrientes que se muevan unas al lado de otras durante cierto recorrido sin que prácticamente se muevan entre sí. La turbulencia de la corriente es también importante para el efecto mezcla, con frecuencia es de mayor importancia la velocidad de circulación.

Mediante la turbulencia se consigue arrastrar la masa global de líquido del tanque e incorporarla a la corriente. La turbulencia se produce como consecuencia de corrientes dirigidas adecuadamente y de los gradientes de velocidad elevados existentes en el seno del líquido. Como veremos más adelante en algunos problemas de agitación, se requieren flujos elevados y una turbulencia relativamente baja mientras que en otros la turbulencia ha de ser alta y las velocidades de circulación poco elevadas.

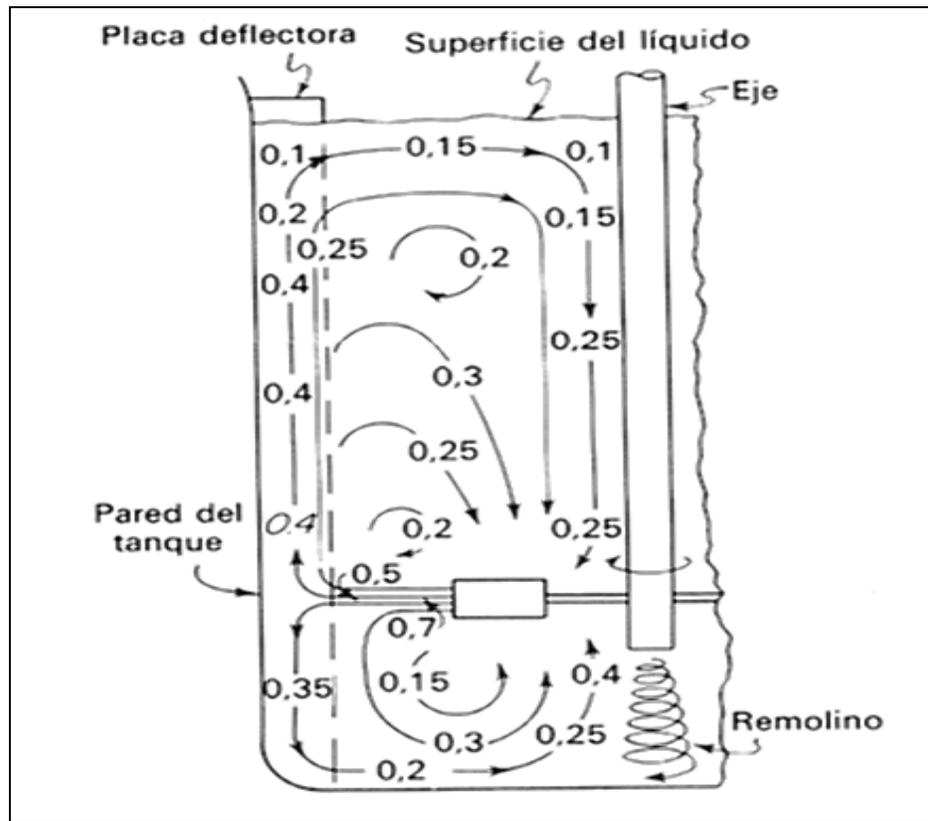
2.9. GRADIENTES Y PERFILES DE VELOCIDAD

El gradiente de velocidad de un tanque agitador varía ampliamente de un punto a otro en el fluido. Así, por ejemplo, si el chorro del líquido que sale del rodete pasa a través de un líquido prácticamente estancado, el gradiente de velocidad en el extremo del chorro puede llegar a ser grande comparados con los gradientes que existen en la masa del líquido. Por otra parte, el gradiente en el extremo del chorro varía con la distancia. A medida que el chorro se aleja del rodete, arrastra el líquido adyacente, desacelerando el chorro y parte del líquido global acelerado en dirección del movimiento del chorro, con lo cual disminuye el gradiente de velocidad en el extremo

del chorro. Los gradientes de velocidad son por lo tanto mayores en las inmediaciones de la descarga del rodete que en cualquier otra parte del tanque; y aunque existen gradientes de velocidad en otras partes del tanque, son generalmente muy pequeños comparados con los que existen en las proximidades del rodete.

En la Figura 14, se representan las corrientes de fluidos que se observan en un tanque de 30 cm que contiene agua fría provista de un agitador de turbina de seis palas de 15 cm de diámetro y que gira a 200 rpm. El plano de observación es un corte diametral que pasa por el eje del rodete y dos placas deflectoras. El fluido abandona el rodete en dirección radial, se separa en corriente longitudinales que fluyen hacia arriba y abajo sobre las placas deflectoras, se dirigen después hacia el eje del rodete y finalmente regresan a al zona de aspiración del mismo. En el fondo del tanque, justamente debajo del eje, el fluido se mueve con un movimiento de remolino; en el resto del tanque, las corrientes son principalmente radiales o longitudinales.

Figura 14. Perfiles de velocidad en un agitador de turbina



Fuente: Tomado de GRAY, J. B.: en V. W. Uhl y J. B. Gray (eds.). "Mixing: Theory and Practice", Vol. I, Academic, New York, 1969; (a) pp. 181-184, (b) pp. 207-208.

Los números de la figura 14, indican la magnitud absoluta de la velocidad del fluido en distintos puntos del tanque expresadas como fracciones de la velocidad en el extremo de las palas del rodete. En las condiciones utilizadas, la velocidad en el extremo de las paletas era 1.5 m/seg. La velocidad del chorro cae rápidamente desde la velocidad máxima hasta un valor relativo de 0.4 en la pared del tanque. Las velocidades en otros puntos del tanque son del orden de 0.25 veces las velocidades del extremo de las palas, si bien existen regiones con forma de bucle en que el fluido está prácticamente

estancado, una en la parte superior del rodete y otra por debajo, en las cuales la velocidad es solamente 0.1 a 0.15 veces la velocidad máxima.

Al aumentar la velocidad del giro del rodete, aumenta la velocidad máxima y la velocidad de circulación. Sin embargo la velocidad del fluido en un determinado punto no aumenta en la misma proporción debido a que cuando la velocidad del chorro es elevada, el arrastre del líquido es mucho mayor que cuando la velocidad es pequeña; y la velocidad del chorro disminuye rápidamente al aumentar la distancia desde el rodete. Para un punto dentro del tanque situado a 6 cm del rodete, según se indica en la figura 14, se ha encontrado que la velocidad del fluido aumenta en la raíz cúbica de la velocidad del rodete.

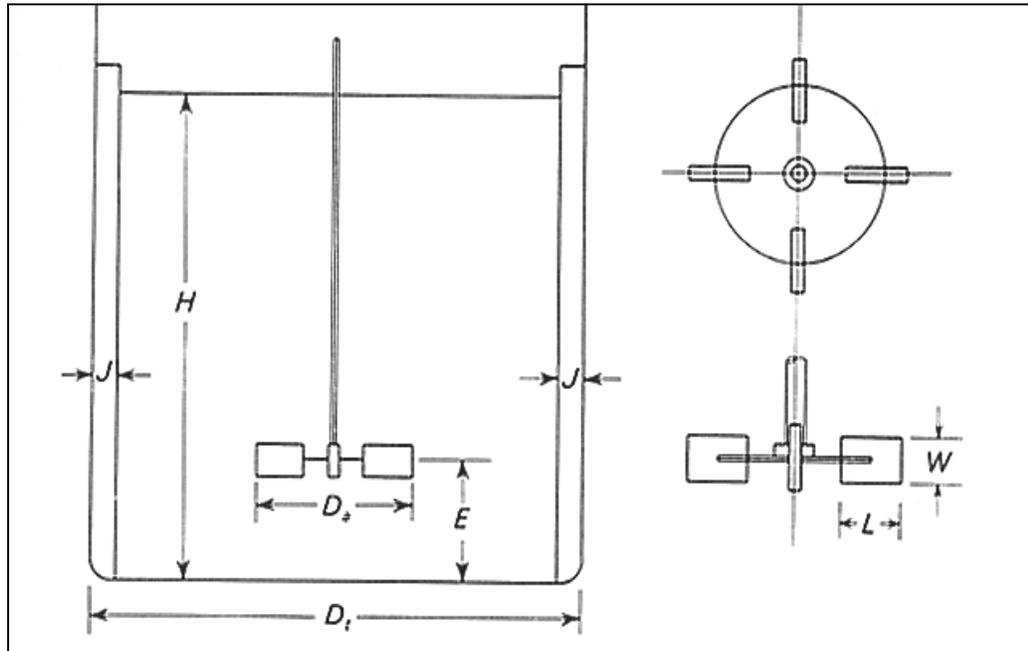
2.10. CONSUMO DE POTENCIA EN TANQUES AGITADORES

Variables Que Influyen Sobre El Consumo De Potencia. Número De Potencia.

Un factor importante en el diseño de un tanque agitado; es la potencia necesaria para mover el rodete. Esta potencia no puede estimarse teóricamente, aun en los sistemas agitadores más sencillo, sino que es preciso determinarla por el mismo tipo de experimentos cualitativos, basado en análisis dimensional que se ha aplicado con éxito a otros problemas de mecánicas de fluidos. Consideremos, por ejemplo, al agitador de turbina con pacas planas que se presenta en la figura 12, supongamos que el tanque esta lleno hasta un nivel determinado (sin agitador), con un líquido con

viscosidad y densidad conocidas, y que el rodete gira ha una velocidad de n revoluciones por unidad de tiempo.

Figura 15. Dimensiones características de un agitador de turbina.



Fuente: Tomado de GRAY, J. B.: en V. W. Uhl y J. B. Gray (eds.). "Mixing: Theory and Practice", Vol. I, Academic, New York, 1969; (a) pp. 181-184, (b) pp. 207-208.

Supongamos también que se conocen todas las dimensiones del aparato, el diámetro del tanque, el diámetro del rodete, la distancia que existe entre el rodete y el fondo del tanque, la altura del líquido y las dimensiones que tienen las placas deflectoras, si se utilizan. Se supone por otra parte que están fijados el número y disposición de las placas deflectoras, así como el número de aletas del rodete. Mediante el análisis dimensional se trata de obtener la relación que ligue la potencia necesaria para mantener la velocidad del giro del rodete en función de las variables anteriores.

La potencia dependerá del tipo de flujo del mezclador y de las proporciones geométricas del equipo. El mecanismo de flujo es una combinación complicada de flujo laminar, turbulento y separación de la capa límite. Las variables controlantes que deben entrar en el análisis son las siguientes: (1) Dimensiones principales del tanque y del rodete, (2) la viscosidad, μ y densidad del líquido, ρ , (3) la velocidad de giro n , y puesto que se va aplicar la ley de Newton, (4) la constante adimensional, g_c . Por otra parte, a menos que se traten de evitar remolinos, se originará un vórtice en la superficie del líquido. Parte del líquido asciende con respecto al nivel medio o sin agitación de la superficie del líquido, y este ascenso ha de vencer a la fuerza de gravedad. Por consiguiente, es preciso considerar también la aceleración de la gravedad g .

Las distintas dimensiones lineales pueden convertirse en relaciones adimensionales, llamadas factores de formas, dividiendo cada una de ellas por otra que se elige arbitrariamente como dimensión fundamental. El diámetro del rodete D_a es una elección adecuada como magnitud fundamental y los factores de forma se calculan dividiendo las restantes dimensiones por D_a . Sea $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$, los factores de formas así definidos. El diámetro del rodete D_a se toma por otra parte como medida del tamaño del equipo y se emplea como variables en el análisis dimensional del mismo modo que se toma el diámetro de la tubería en el estudio de pérdidas de carga por fricción en una conducción. Dos mezcladores de las mismas proporciones geométricas, pero de tamaños diferentes, tendrán factores de forma idénticos, pero

diferirán en el valor de D_a . Los aparatos que cumplen esta condición se dice que son geoméricamente semejantes o que poseen semejanza geométrica.

Ignorando de momento los factores de forma, y suponiendo que el líquido es newtoniano, la potencia P es una función de las restantes variables, es decir:

$$P = \Psi(n, D_a, g_c, \mu, g, \rho) \quad (1)$$

Aplicando el método de análisis dimensional resulta:

$$\frac{Pg_c}{n^3 D_a^5 \mathbf{r}} = \mathbf{y} \left(\frac{nD_a^2 \mathbf{r}}{\mathbf{m}}, \frac{n^2 D_a}{g} \right) \quad (2)$$

Teniendo los factores de forma la Ec (2) puede escribirse:

$$\frac{Pg_c}{n^3 D_a^5 \mathbf{r}} = \mathbf{y} \left(\frac{nD_a^2 \mathbf{r}}{\mathbf{m}}, \frac{n^2 D_a}{g}, S_1, S_2, S_3, \dots, S_n \right) \quad (3)$$

El primer grupo adimensional de la Ec (3) $\frac{Pg_c}{n^3 D_a^5 \mathbf{r}}$ recibe el nombre de número de

potencia y se representa por N_{po} . El segundo $\frac{nD_a^2 \mathbf{r}}{\mathbf{m}}$ es el número de Reynolds, N_{RE}

y el tercero $\frac{n^2 D_a}{g}$, es el número de Froude, N_{FR} . La Ec (3) puede escribirse entonces:

$$N_{po} = \Psi(N_{RE}, N_{FR}, S_1, S_2, S_3, \dots, S_n). \quad (4)$$

2.11. SIGNIFICADO DE LOS GRUPOS ADIMENSIONALES

Pueden darse interpretaciones sencillas a los grupos adimensionales de la Ec (2).

Consideremos el grupo $\frac{nD_a^2 r}{m}$.

Si la velocidad periférica del giro del rodete se representa por $u_a = \pi D_a n$ (5)

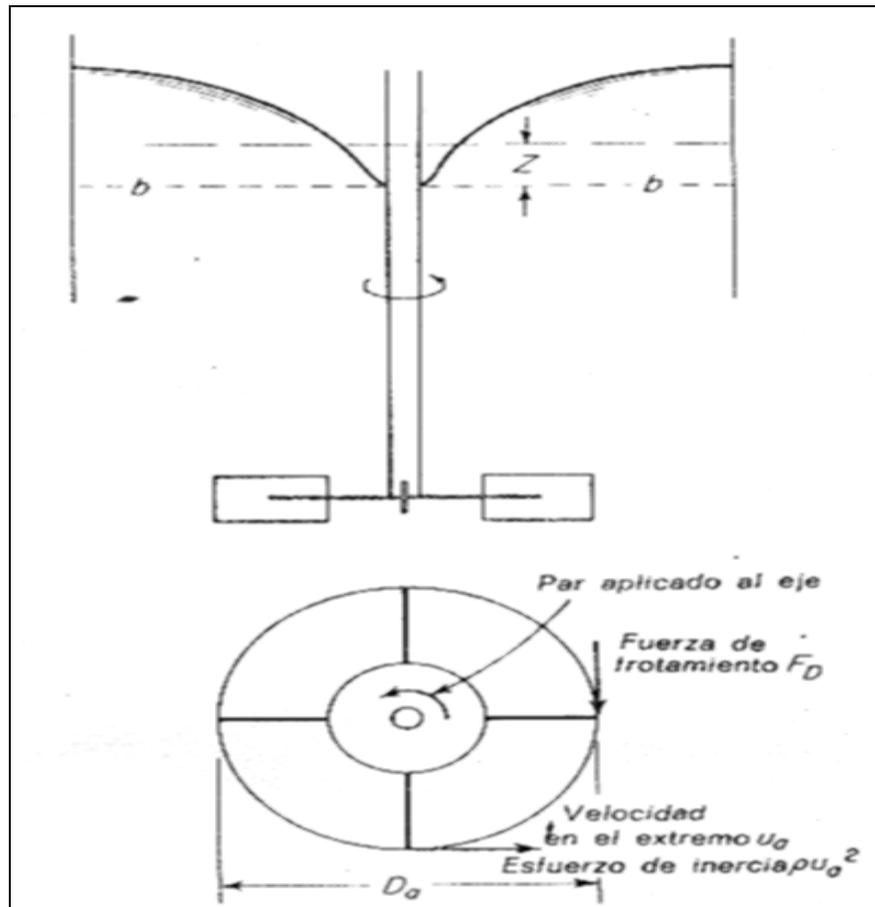
Y entonces:

$$N_{RE} = \frac{nD_a^2 r}{m} = \frac{(nD_a)D_a r}{m} a \frac{u_a D_a r}{m} \quad (6)$$

Este grupo es proporcional al número de Reynolds, basado en el diámetro y en la velocidad de la periferia de giro del rodete, siendo esta razón de llamar así a este grupo.

Para interpretar el número de potencia, consideramos el movimiento de las aspas del rodete entro del liquido. Al movimiento de las paletas se oponen unas fuerzas de frotamiento que actúan sobre el área del rodete. Imaginemos que esta fuerza de frotamiento puede ser sustituida por una fuerza equivalente F_D que actúa sobre los extremos de las palas del rodete, según se indica la siguiente figura.

Figura 16. Fuerzas que actúan sobre un rodete en rotación.



Fuente: Tomado de GRAY, J. B.: en V. W. Uhl y J. B. Gray (eds.). "Mixing: Theory and Practice", Vol. I, Academic, New York, 1969; (a) pp. 181-184, (b) pp. 207-208.

Por definición de fuerzas de frotamiento F_D en función del coeficiente de frotamiento es igual a:

$$F_D = C_D \frac{A_p u_o^2 r}{2g_c}$$

Puesto que están fijados los factores de forma, el área A_p es proporcional a D_a^2 . Por

otra parte, la velocidad u_o puede considerarse que es proporcional a u_a .

Empleando estas relaciones de proporcionalidad, substituyendo el valor de u_a de acuerdo con la Ec (5) y omitiendo las constantes numéricas se obtiene:

$$F_D \propto C_D \frac{D_a^2 (D_a n)^2 p}{g_c} = C_D \frac{D_a^4 n^2 p}{g_c} \quad (7)$$

La velocidad con que se mueve la fuerza F_d es igual a $\Pi n D_a$ y la potencia P es por consiguiente:

$$P = \Pi n F_D D_a \quad (8)$$

Sustituyendo F_D de la Ec (7) en la Ec (8), se obtiene:

$$P \propto C_D \frac{n^3 D_a^5 p}{g_c}$$

y

$$N_{po} = \frac{P g_c}{n^3 D_a^5 p} \propto C_D \quad (9)$$

Por consiguiente, el número de potencia es proporcional al coeficiente de frotamiento del rodete. Puesto que, de acuerdo con la Ec (7), el coeficiente de frotamiento es igual a la relación que existe entre la fuerza de frotamiento y la fuerza de inercia; el número de potencia puede interpretarse de este modo.

Para interpretar el tercer grupo adimensional $n^2 D_a^3 / g$, consideremos el volumen del líquido que está situado sobre el plano b-b, que pasa por la parte inferior del vórtice, tal como se indica en la Fig. 16. Como consecuencia del vórtice, existen fuerzas gravitacionales no equilibradas que son proporcionales a la masa de líquido que está influenciada por el vórtice. Si designamos por Z la altura del líquido sobre el plano b-b, por A, el área de la sección transversal del tanque, por $\rho A Z$ la masa de líquido, entonces la fuerza de gravedad por unidad de área de la sección transversal puede expresarse como:

$$\frac{F_g}{A_t} \propto \frac{Z \rho g A_t}{g_c A_t} = \frac{Z \rho g}{g_c} \quad (10)$$

Suponiendo que existe semejanza geométrica, la altura Z es proporcional al diámetro del rodete D_a , y el esfuerzo cortante correspondiente a F_g es igual a:

$$t_g = \frac{F_g}{A_t} \propto \frac{D_a \rho g}{g_c}$$

El esfuerzo cortante de inercia τ_i , es proporcional a $u_a^2 \rho / g_c$ o a $n^2 D_a^2 \rho / g_c$, y por consiguiente:

$$\frac{t_i}{t_g} \propto \frac{n^2 D_a^2 \rho / g_c}{D_a \rho g / g_c} = \frac{n^2 D_a}{g} = N_{Fr} \quad (11)$$

El número de Froude es evidentemente una medida de la relación entre los esfuerzos de inercia y los esfuerzos de gravedad. El número de Froude interviene en dinámica de fluidos siempre que existe un movimiento de ondas importante sobre la superficie de líquido. Es especialmente importante en el diseño de barcos. Las Ecs (6), (9) y (11), pueden expresarse dimensionalmente en la forma siguiente:

$$[N_{Re}] = \left[\frac{\text{esfuerzo.de.inercia}}{\text{esfuerzo.cor tan te}} \right]$$

$$[N_{po}] = \left[\frac{\text{esfuerzo.de.frotamiento}}{\text{esfuerzo.de.inercia}} \right]$$

$$[N_{Fr}] = \left[\frac{\text{esfuerzo.de.inercia}}{\text{esfuerzo.gravitacional}} \right]$$

Como los esfuerzos individuales están definidos arbitrariamente, y varían mucho de un punto a otro del agitador, sus valores numéricos locales no son significativos. Sin embargo, las magnitudes de los grupos adimensionales para todo el sistema son significativas en cuanto permiten correlacionar magnitudes que dan lugar a ecuaciones empíricas más sencillas que las basadas en la Ec. (11). Las ecuaciones que se dan a continuación para el número de potencia, son ejemplos de tales correlaciones.

2.12. CORRELACIONES DE POTENCIA PARA RODETES ESPECÍFICOS

Los diferentes factores de forma de la E_c (4) dependen del tipo de aparato y de su disposición. En la Fig. 15 se representa un caso típico en el que se indica las dimensiones necesarias y los factores de forma correspondientes. Las dimensiones son: (1) diámetro del tanque D_t , (2) altura del rodete sobre el fondo del tanque E , (3) longitud de las palas del rodete L , (4) anchura de las palas W , (5) anchura de las palas deflectoras J y (6) altura de liquido H . Se debe especificar también el número de placas deflectoras y el número de palas del rodete. Si se utiliza un agitador de hélice, el paso de hélice, es una magnitud importante. Los factores de forma para el agitador de la Fig. 15 son $S_1 = D_t/D_a$, $S_2 = E/D_a$, $S_3 = L/D_a$, $S_4 = W/D_a$, $S_5 = J/D_t$, $S_6 = H/D_t$.

El número de Froude interviene cuando se forma vórtice y solamente para números de Reynolds superiores a 300. En tanques con placas deflectoras con agitadores de hélices introducidos lateralmente o para números de Reynolds

inferiores a 300 no se forma vórtice y el número de Froude deja de ser una variable.

Cuando interviene el número de Froude su efecto se tiene en cuenta mediante la ecuación exponencial:

$$\frac{N_{po}}{N_{Fr}^m} = \phi(N_{Re}, S_1, S_2, \dots, S_n) = f \quad (12)$$

Siendo ϕ la función de potencia.

El exponente m de la Ec (12) para un determinado conjunto de factores de forma está relacionado empíricamente con el número de Reynolds mediante la ecuación:

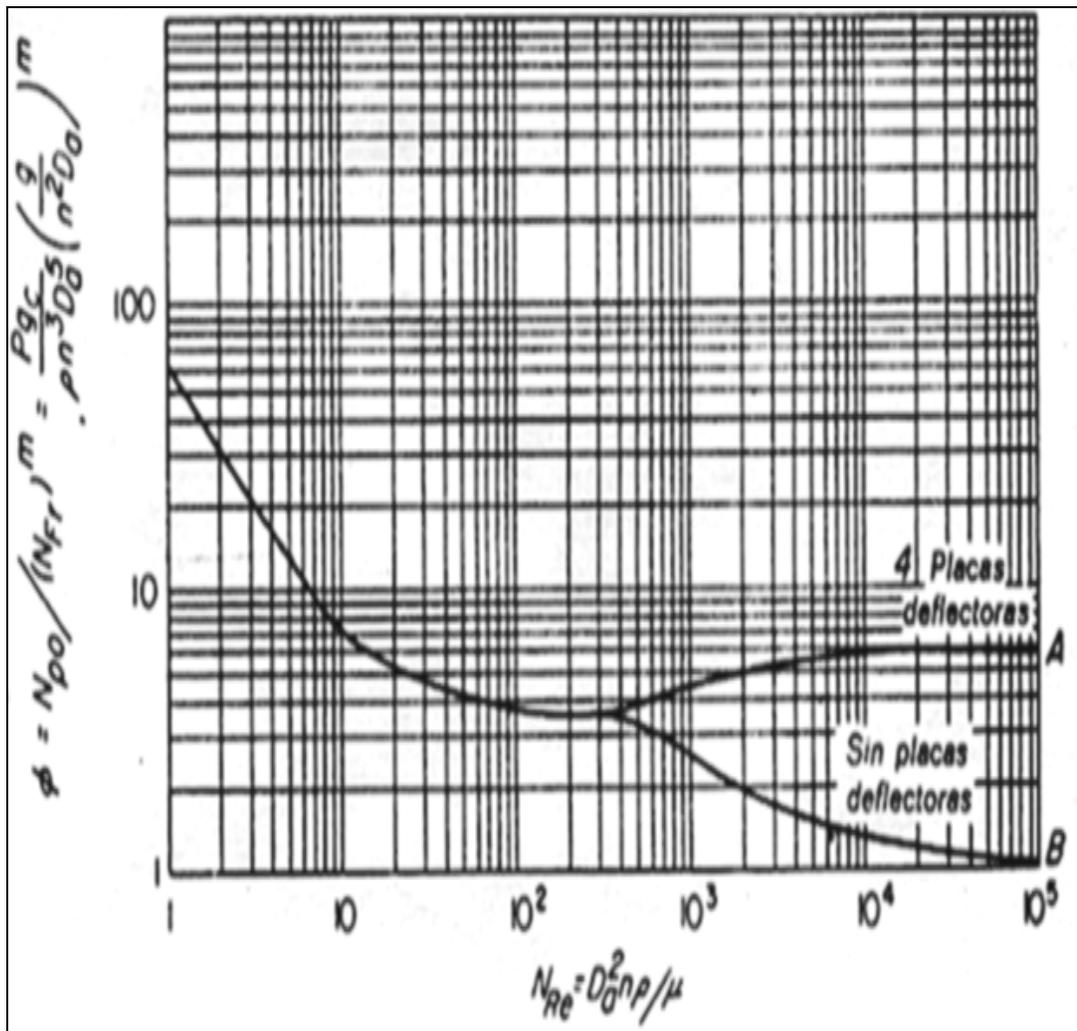
$$m = \frac{a - \log N_{Re}}{b} \quad (13)$$

Siendo a y b constantes. Los valores de a y b para las curvas de las figuras. 18 y 19, se dan en la siguiente tabla.

Tabla 2. Constante a y b de la Ec. 13.

Fig.	Línea	a	B
14	B	1,0	40,0
15	A	1,7	18,0
15	C	0,0	18,0
15	B	2,3	18,0

Figura 17. Función de potencia Φ frente N_{Re} para un agitador de turbina de seis palas.

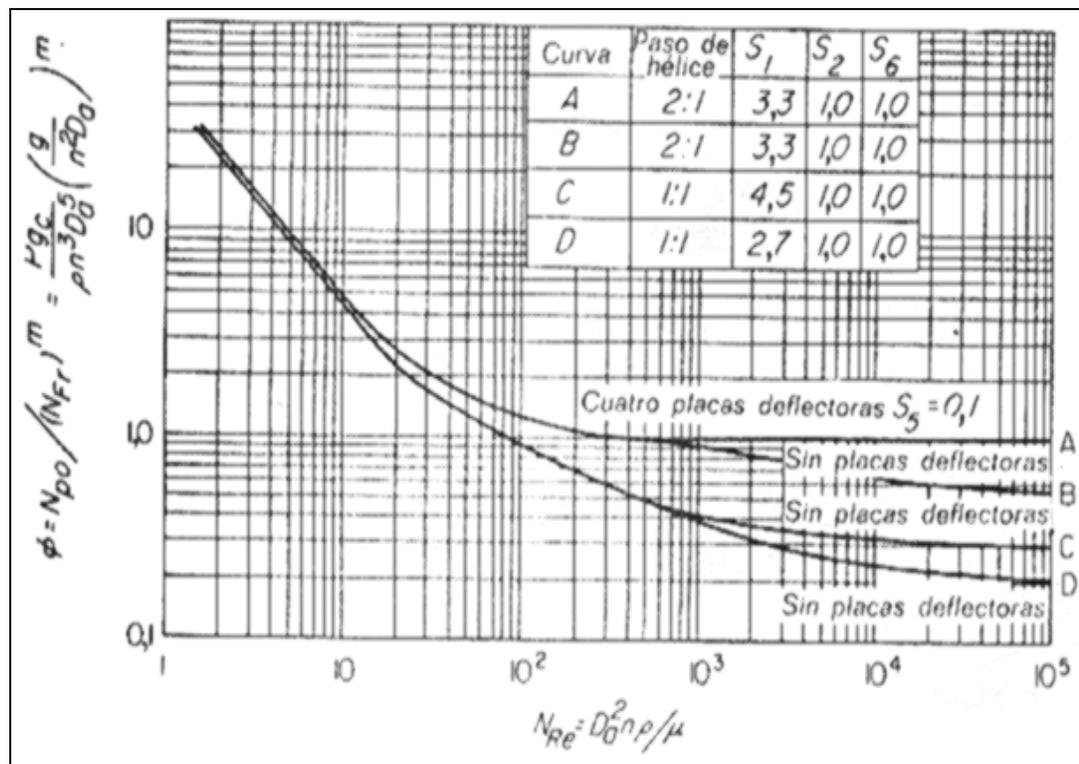


Fuente: Tomado de GRAY, J. B.: en V. W. Uhl y J. B. Gray (eds.). "Mixing: Theory and Practice", Vol. I, Academic, New York, 1969; (a) pp. 181-184, (b) pp. 207-208.

Para aplicar la Ec. (12) se determina el valor de ϕ experimentalmente en función del número de Reynolds para factores de forma constantes y se representan curvas de ϕ frente a N_{Re} para cada conjunto de factores de forma. En la bibliografía pueden encontrarse curvas para distintas formas de rodetes típicos.

En la Fig.17 se da una representación típica de ϕ frente a N_{Re} aplicable a tanques equipados con agitadores de turbina verticales, centrados y con seis palas planas. Los factores de forma importantes son $S_1= 3$, $S_2= 1.0$, $S_3 = 0.25$, $S_6 = 1.0$. Cuando se disponen cuatro placas deflectoras, cada una con una anchura igual a la décima parte del diámetro del tanque ($S_5= 0.1$), se utiliza la curva A y $\phi = N_{po}$. Si no se utilizan placas deflectoras, se aplica la curva B y debe incluirse el número de Froude en el valor de ϕ para números de Reynolds superiores a 300.

Figura 18. Función de potencia Φ frente a N_{Re} para agitadores de hélice de tres palas.



Fuente: Tomado de GRAY, J. B.: en V. W. Uhl y J. B. Gray (eds.). "Mixing: Theory and Practice", Vol. I, Academic, New York, 1969; (a) pp. 181-184, (b) pp. 207-208.

En la Fig. 18 se representan curvas típicas para mezcladores de hélice de tres palas. Para todas las curvas la hélice está situada a una distancia de un diámetro del fondo del tanque y $S_2 = 1.0$. Las curvas A y B, se aplican a palas con un paso de hélice igual a 2.0, para una relación tanque-hélice $S_1 = 3.3$. La curva A se aplica a tanques con cuatro placas deflectoras, siendo $S_5 = 0.1$. La curva B se aplica a tanque sin placas deflectoras. Las curvas C y D, representan el efecto que sobre N_{po} tiene la variación del factor d_3e escala S_1 , relación tanque-hélice cuando el paso aproximadamente igual a 1.0. Para bajos números de Reynolds desaparece el efecto de la variación de $S_1 = 4.5$ y la D cuando $S_1 = 2.7$.

2.13. EFECTO DE LA GEOMETRÍA DEL SISTEMA

El efecto que sobre N_{po} ejercen los factores de forma S_1, S_2, \dots, S_n , de la Ec. (4) puede ser mayor o menor. Ocurre que a veces dos o mas factores están relacionados entre si, es decir, el efecto que provoca la variación de S_1 , por ejemplo, puede depender de la magnitud de S_2 o S_3 . En un agitador de turbina de paletas planas que opera con números de Reynolds elevados en un tanque con placas deflectoras, los efectos debidos a la variación de la geometría del sistema pueden resumirse en la forma siguiente:

- Al aumentar S_1 relación entre el diámetro del tanque y el diámetro del rodete, N_{po} aumenta cuando las placas deflectoras son pocas y estrechas, y disminuye cuando son muchas y anchas. Los factores de forma S_1 y S_5 , por consiguiente, están

relacionados entre sí. Utilizando cuatro placas deflectoras 1/12 como valor de S_5 , lo cual es frecuente en la práctica industrial, las variaciones de S_1 no influyen prácticamente sobre N_{po} .

- El efecto que se produce al variar S_2 depende del diseño de la turbina. Al aumentar S_2 , aumenta N_{po} para una turbina de disco del tipo que se representa en la Fig. 15. En un agitador de turbina con paletas inclinadas, un aumento de S_2 hace disminuir considerablemente el valor de N_{po} ; si las paletas son rectas, la disminución de N_{po} es muy suave.

- En un agitador de turbina abierto con paletas rectas, el efecto que tiene lugar al variar S_4 , relación entre la anchura de las paletas y el diámetro del rodete, depende del número de paletas. En un agitador de turbina con 6 paletas, N_{po} aumenta proporcionalmente con S_4 , en uno de 4 paletas, N_{po} aumenta con S_4 .

- Un agitador de turbina de paletas inclinadas comunica una potencia menor que uno de paletas rectas. Cuando las paletas forman un ángulo de 45° con el eje del rodete, N_{po} es igual a 0.4 veces su valor si las paletas fuesen paralelas al eje.

- Dos agitadores de turbina de paletas rectas situados sobre el mismo eje comunican aproximadamente 1.9 veces la potencia de un solo agitador, con tal que la separación que existen entre los dos rodetes sea por lo menos igual al diámetro de los mismos. Si la separación es pequeña, la potencia transmitida puede llegar a ser 2.4 veces la potencia de una sola turbina.

- La forma del tanque tiene relativamente poca importancia sobre N_{po} . La potencia consumida en un tanque cilíndrico horizontal con placas deflectoras o sin ellas, o en un tanque vertical de sección transversal cuadrada provisto de placas deflectoras es la misma que en un tanque cilíndrico vertical. Para un tanque sin placas deflectoras, el número de potencia es aproximadamente igual a 0.75 veces su valor para un tanque cilíndrico con placas deflectoras. Los tipos de flujo están evidentemente muy influenciados por la forma del tanque aun cuando no ocurre lo mismo con el consumo de potencia.

3.14. CALCULO DEL CONSUMO DE POTENCIA

La potencia suministrada al líquido se calcula combinando la Ec. (12) con la definición de N_{po} , obteniéndose:

$$P = \frac{f \cdot N_{Fr}^m \cdot n^3 \cdot D_a^5 \rho}{g_c} \quad (14)$$

Cuando el número de Froude no es un factor importante, la potencia está dada por:

$$P = \frac{f \cdot n^3 \cdot D_a^5 \rho}{g_c} \quad (15)$$

Para bajos números de Reynolds, coinciden las líneas de N_{po} frente a N_{Re} , tanto para tanques con placas deflectoras como sin ellas, y la pendiente de la lineal en coordenadas logarítmicas es igual a -1 . En este intervalo el flujo es laminar, la densidad deja de ser un factor importante y la Ec. (12) se transforma en:

$$N_{po}N_{Re} = \frac{Pg_c}{n^2 D_a^3 m} = K_L = \mathbf{y}(S_1, S_2, \dots, S_n) \quad (16)$$

A partir de la ecuación:

$$P = \frac{K_L n^2 D_a^3 m}{g_c} \quad (17)$$

Las Ecs. (16) y (17) pueden emplearse cuando N_{Re} es menor que 10.

En tanques con placas deflectoras y para números de Reynolds superiores a 10.000, la función de potencia es independiente del número de Reynolds y la viscosidad deja de ser un factor. Las variaciones de N_{Fr} tampoco influyen. En este intervalo el flujo es completamente turbulento y la Ec. (12) se transforma en:

$$N_{po}K_T = \mathbf{y}_T(S_1, S_2, \dots, S_n) \quad (18)$$

De la cual:

$$P = \frac{K_T n^3 D_a^5 p}{g_c} \quad (19)$$

En la tabla 2 se dan los valores de las constantes K_L y K_T para diferentes tipos de rodetes y tanques.

Tabla 3. Valores de las constantes K_L y K_T en la Ecs.(16) y (18) para tanques provisto de cuatro placas deflectoras situadas en la pared y con una anchura igual a 10% del diámetro del tanque.

TIPO DE RODETE	K_L	K_T
Hélice (paso cuadrado, 3 palas)	41,0	0,32
Hélice (paso igual a 2, 3 palas)	43,5	1,00
Turbina (6 palas planas)	71,0	6,30
Turbina (6 palas curvadas)	70,0	4,80
Ventilador de turbina (6 paletas)	70,0	1,65
Paletas planas (2 palas)	36,5	1,70
Turbina cerrada (6 palas curvadas)	97,5	1,08
Turbina cerrada (con stator, sin placas deflectoras)	172,5	1,12

Fuente: Tomado de GRAY, J. B.: en V. W. Uhl y J. B. Gray (eds.). "Mixing: Theory and Practice", Vol. I, Academic, New York, 1969; (a) pp. 181-184, (b) pp. 207-208.

2.14.1. Ejemplos calculo de la potencia. A continuación se estudian dos ejemplos del tema anterior.

En el primer ejemplo se considerará una turbina de 6 palas planas que se instala en el centro de un tanque vertical. El tanque tiene 1.8 m de diámetro, la turbina 0.6 m de diámetro y está situada a 0.6 m del fondo del tanque.

El tanque se llena hasta una altura de 1.8 metros con una disolución de soda cáustica al 50% y a 65°C, que tiene una viscosidad de 12 centipoises y una densidad de 1498 kg/m³. Además, La turbina opera a 90 rpm, y el tanque no tiene placas deflectoras.

Calcular la potencia necesaria para el funcionamiento del mezclador.

Solución.

Para las condiciones del problema ha de utilizarse la curva B de la Fig. 18.

Se calculan los números de Reynolds y Froude, para lo cual las magnitudes que se han de sustituir en unidades acordes son:

$$D_a = 0.6 \text{ m.}$$

$$n = \frac{90}{60} = 1.5 \text{ rps}$$

$$\mu = 12 \times 10^{-3} \text{ kg/m-seg.}$$

$$\rho = 1.498 \text{ kg/m}^3.$$

$$g = 9.81 \text{ m/seg}^2.$$

Por tanto:

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 np}{m} = \frac{0.6^2 \times 1.5 \times 1.498}{12 \times 10^{-3}} = 67.410$$

$$N_{Fr} = \frac{n^2 D_a}{g} = \frac{1.5^2 \times 0.6}{9.81} = 0.14$$

De la tabla 9-1, las constantes a y b que se han de sustituir en la Ec. (14) Son: a = 1.0 y b = 40.0. De la Ec.(13):

$$m = \frac{1.0 - \log 69.600}{40.0} = -0.096$$

De la curva B (Fig. 18) para $N_{Re} = 67.410$, $\phi = 1.07$, y por la Ec. (14):

$$P = \frac{1.07 \times 0.14^{0.096} \times 1.5^3 \times 0.6^5 \times 1.498}{9.81} = 51.8 \text{ m-kgs}$$

La potencia necesaria es por lo tanto:

$$\frac{51.8}{75} = 0.69 \text{ CV}$$

Para el segundo caso se considerará una turbina de 6 palas con goma látex. Aquí, se desea emplear el mezclador del ejemplo anterior para mezclar un compuesto de goma látex que posee una viscosidad de 120000 centipoises y una densidad de 1.120 kg/m³.

Calcular la potencia necesaria.

Solución.

El número de Reynolds es ahora:

$$N_{Re} = \frac{0.6^2 \times 1.5 \times 1.120}{120000 \times 10^{-3}} = 5.04$$

Este valor está dentro del intervalo de flujo laminar y $\phi = N_{po}$. Para $N_{Re} = 5.04$, de acuerdo con la figura 18, $N_{po} = 12.5$ y:

$$P = \frac{125 \times 1.5^3 \times 0.6^5 \times 1.120}{9.81} = 374.5 \text{ m-kg/seg}$$

La potencia necesaria es por lo tanto 374.5. Esta potencia es independiente de que el tanque posea o no placas deflectoras. No hay razón para usar placas deflectoras en un tanque que opere con números de Reynolds tan bajos, ya que en tales condiciones no tiene lugar la formación de vórtice.

Nótese que un aumento de 10.000 veces en la viscosidad da origen a un aumento de potencia del orden del 60% sobre la que se requiere para un tanque con placas deflectoras que opere con un líquido poco viscoso.

2.15. CONSUMO DE POTENCIA EN LÍQUIDOS NO NEWTONIANOS

En las correlaciones de datos de potencia de líquidos no newtonianos, el número de potencia $Pg \sqrt[n^3]{D_a^5 p}$ se define de la misma que para fluidos newtonianos. El número de Reynolds no se define fácilmente, ya que la viscosidad aparente del fluido varía con el gradiente de velocidad, y este varía considerablemente de un punto a otro del tanque. Sin embargo, se han obtenido correlaciones útiles con un número de Reynolds definido de acuerdo con la Ec. (6) utilizando una viscosidad media aparente μ_{ap} calculada a partir del gradiente medio de la velocidad (du/dy). El número de Reynolds es pues:

$$N_{Re,n} = \frac{nD_a^2 p}{m_{ap}} \quad (20)$$

Para un fluido que sigue la ley de la potencia, de acuerdo con la Ec.(3.8), la viscosidad media aparente está relacionada con el gradiente medio de velocidad de acuerdo con la ecuación:

$$m_{ap} = K \left(\frac{du}{dy} \right)_{med}^{n^t-1} \quad (21)$$

Substituyendo en la Ec. (20) se obtiene:

$$N_{Re,n} = \frac{nD_a^2 p}{K^t (du/dy)_{med}^{n^t-1}} \quad (22)$$

Para un agitador de turbina de palas rectas, se ha encontrado que para fluidos pseudoplásticos el gradiente medio de velocidad dentro del tanque está íntimamente relacionado con la velocidad del rodete. Para numerosos líquidos pseudoplásticos una relación satisfactoria, aunque aproximada, es la siguiente:

$$\left(\frac{du}{dy}\right)_{med} = 11n \quad (23)$$

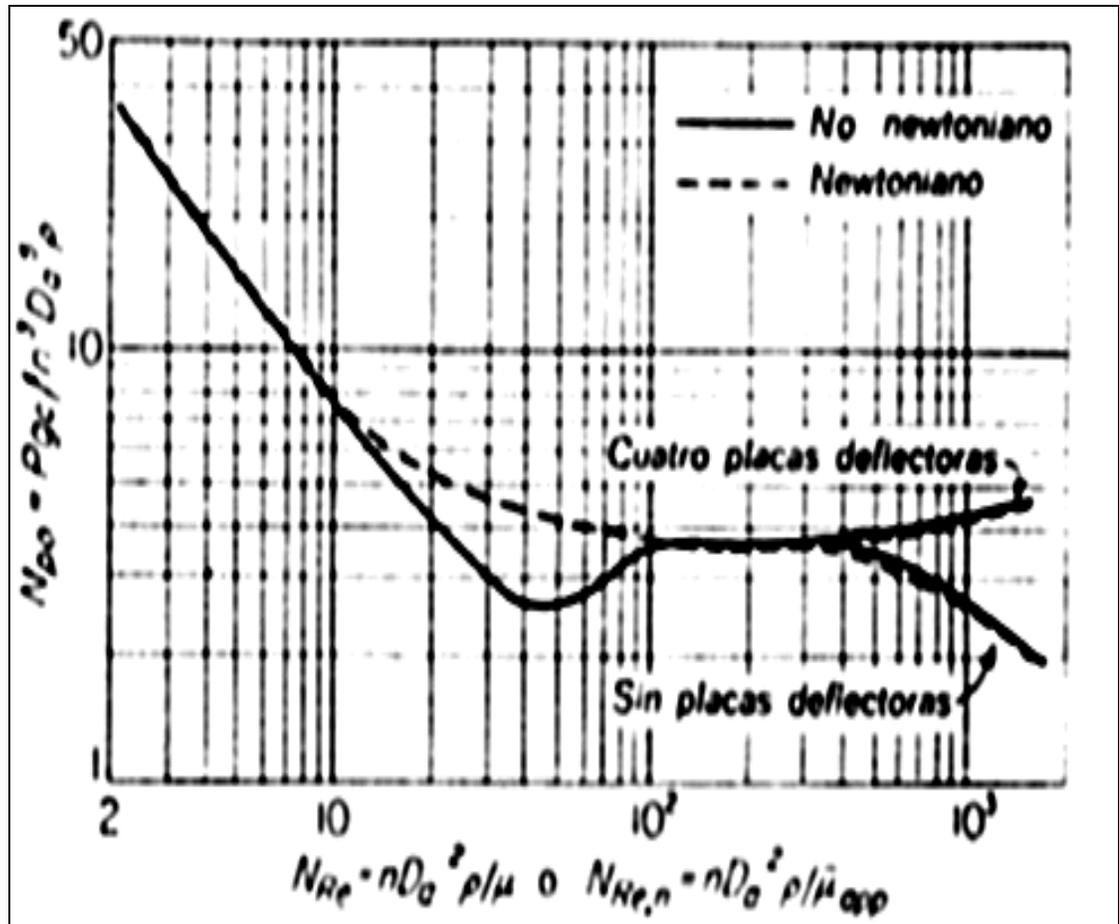
Combinando las Ecs. (22) y (23), se obtiene:

$$N_{Re,n} = \frac{n^{2-n'} D_a^2 P}{11^{n'-1} K^t} \quad (24)$$

En la Figura 19 se presenta la correlación número de potencia-número de Reynolds para un rodete de turbina de 6 palas con fluidos pseudoplásticos. La línea de trazos está tomada de la Figura 17 y se aplica a fluidos newtonianos, en los cuales $N_{Re} = nD_{ap}^2/\mu$. La curva continua corresponde a líquidos pseudoplásticos, en los cuales $N_{Re,n}$ está dado por las Ecs. (20) y (24). Para números de Reynolds menores que 10 y mayores que 100, los resultados que se obtienen para líquidos pseudoplásticos son los mismos para líquidos newtonianos. En el intervalo entre 10 y 100 del número de Reynolds, los líquidos consumen una potencia menor que los líquidos newtonianos. La transición de flujo laminar a turbulento en líquidos pseudoplásticos no tiene lugar hasta que N_{Re} es igual a 40, en vez de 10, como ocurre para los líquidos newtonianos.

Los modelos de flujo en un líquido pseudoplástico agitado difieren considerablemente de los modelos de un líquido newtoniano. En las proximidades del rodete, los gradientes de velocidad son elevados y la velocidad son elevados y la viscosidad aparente es pequeña para un líquido pseudoplástico. A medida que el líquido se aleja del rodete, el gradiente de velocidad disminuye y aumenta la viscosidad aparente del líquido. La velocidad del líquido cae rápidamente, los gradientes de velocidad disminuyen aun con mayor rapidez y la viscosidad aparente aumenta por consiguiente todavía más. Incluso cuando existe una turbulencia elevada en las proximidades del rodete, la masa global del líquido puede moverse con flujo laminar lento y consumir relativamente poca potencia. Los anillos en forma de bucle del líquido estancado que se indican en la Fig. 14 son muy marcados cuando el líquido que se agita es pseudoplástico.

Figura 19. Correlación de potencia para una turbina de seis palas con fluidos no Newtoniano.



Fuente: Tomado de GRAY, J. B.: en V. W. Uhl y J. B. Gray (eds.). "Mixing: Theory and Practice", Vol. I, Academic, New York, 1969; (a) pp. 181-184, (b) pp. 207-208.

3. MODELACIÓN

3.1. LA MODELACIÓN Y SUS DIFICULTADES

Lo que hemos aprendido hasta ahora acerca de la homogeneidad dimensional se resume en los dos métodos, el producto de potencias y el teorema pi, para llevar una relación físicamente homogénea a su forma adimensional. Aunque esta transformación sea matemáticamente correcta, hay ciertas dificultades ingenieriles previas que necesitan ser discutidas.

En primer lugar, hemos dado más o menos por cierto que es posible especificar todas las variables que intervienen en el proceso. Realmente, la selección de las variables que influyen en el mismo necesita gran juicio y experiencia. El ingeniero debe decidir, por ejemplo, cuándo debe despreciarse la viscosidad. ¿Son importantes los efectos de la temperatura? ¿Es importante la tensión superficial? ¿Qué pasa con la rugosidad? Cada grupo adimensional que se retiene aumenta el precio y el esfuerzo necesario.

El juicio correcto sobre qué variables deben retenerse en cada caso es consecuencia de la práctica y madurez.

Una vez que se han seleccionado las variables y realizado el análisis dimensional, el investigador debe buscar la *sernejanza* entre el modelo ensayado y el prototipo a diseñar. Con suficientes ensayos, los datos obtenidos del modelo

Proporcionarán la función adimensional buscada

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_k) \quad (1)$$

Con la ecuación (1) disponible en tablas, gráficas o en forma analítica, estamos en posición de asegurar la semejanza completa entre el modelo y prototipo. Una definición formal podría ser la siguiente:

Las condiciones del flujo para un modelo de ensayo son completamente semejantes a las del prototipo si los valores correspondientes al modelo y prototipo coinciden para todos los parámetros adimensionales.

Esto se obtiene matemáticamente de la ecuación (1). Si $\Pi_{2m} = \Pi_{2p}, \Pi_{3m} = \Pi_{3p},$ etc., la ecuación (1) garantiza que el valor buscado de Π_{1m} es igual a Π_{1p} . Pero esto es más fácil de decir que de hacer, como veremos ahora.

Por ser difícil de conseguir la semejanza completa, la literatura ingenieril habla de tipos particulares de semejanza, las más comunes son la geométrica, cinemática, dinámica y térmica. Consideremos cada una por separado.

3.2. SEMEJANZA GEOMÉTRICA

La semejanza geométrica se refiere a la dimensión longitud $\{L\}$ y debe asegurarse que se cumple, antes de proceder a los ensayos con cualquier modelo. Una definición formal es la siguiente:

Un modelo y prototipo son geoméricamente semejantes si, y sólo si, todas las dimensiones espaciales en las tres coordenadas tienen la misma relación de escala lineal.

Obsérvese que *todas* las longitudes deben de estar referidas a la misma escala. Es como si se tomase una fotografía del prototipo y la redujésemos o agrandásemos hasta que tuviese el tamaño del modelo. Si el modelo está hecho a un décimo de tamaño del prototipo, su longitud anchura y altura deben ser diez veces más pequeñas. No sólo eso, sino que cualquiera de sus dimensiones deben ser diez veces más pequeños, y, técnicamente, hablaremos de puntos *homólogos*, que son los puntos que tienen la misma posición relativa. Por ejemplo, el borde de ataque del prototipo es homólogo al borde de ataque del modelo. El extremo izquierdo del prototipo de un ala es homólogo al extremo izquierdo del modelo. La semejanza geométrica requiere que todos los puntos homólogos estén relacionados por la misma relación de escala lineal. Esto se aplica tanto a la geometría del fluido como del modelo:

En la semejanza geométrica todos los ángulos se conservan. Todas las direcciones del flujo se conservan. La orientación del modelo y del prototipo con respecto

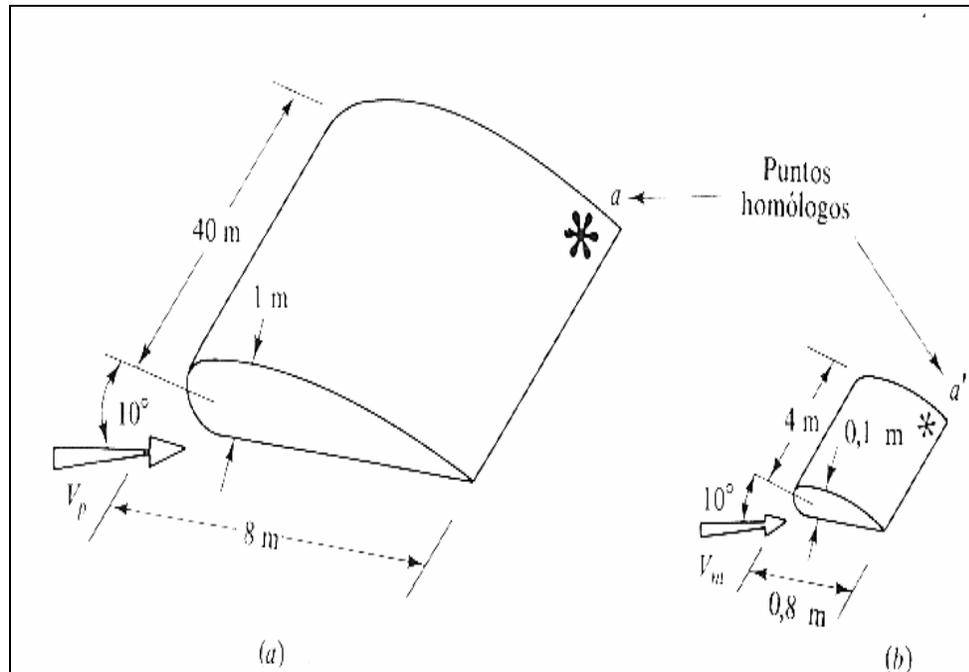
a los objetos de los alrededores debe ser idéntica.

La figura 20. Ilustra un prototipo de ala y su modelo a escala un décimo. Las longitudes del modelo son todas un décimo más pequeñas, pero su ángulo de ataque con respecto a la corriente libre es el mismo. 10° no 1° . Todos los detalles geométricos del modelo deben estar a escala, y a veces se pasan por alto algunos de ellos por ser muy sutiles:

- El radio de borde de ataque del modelo debe ser un décimo más pequeño.
- La rugosidad de la superficie del modelo debe ser un décimo más pequeña.
- Si el prototipo tiene un alambre perturbador de 5 mm, para inducir la transición de la capa límite a turbulenta, situado a 1,5 m del borde de salida, el modelo debe tener un alambre de 0,5 mm situado a 0,15 m del borde de salida.
- Si el prototipo se construye con remaches que sobresalen, el modelo debe tener los remaches correspondientes de tamaño un décimo menor.

Y así sucesivamente. Habrá violación de la semejanza geométrica cuando el modelo no cumple todas estas exigencias, si bien quizá sea posible mostrar mediante contraste experimental que el comportamiento del prototipo no va a estar afectado por la discrepancia.

Figura 20. Semejanza geométrica en el ensayo con modelos (a) prototipo; (b) modelo a escala un décimo.

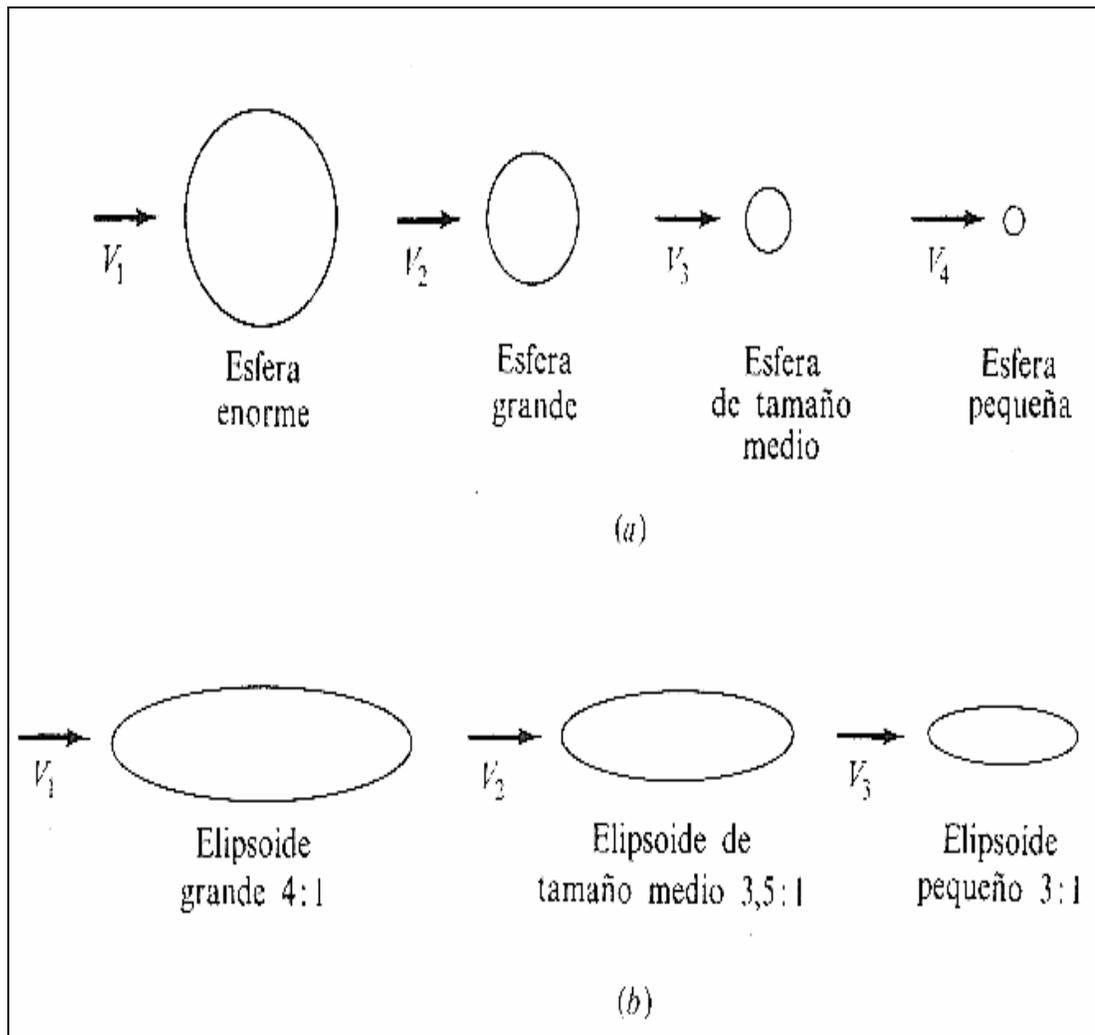


Fuente: Tomado de HUNSAKER, J. C., And RIGHTMIRE, B. G.: Engineering Applications of Fluid Mechanics, Capitulo 7, McGraw-Hill, New York, 1997.

El usuario de modelos se arriesga cuando utiliza modelos que parecen semejantes en su forma, pero que violan claramente la semejanza geométrica. La figura 21 ilustra este punto. Las esferas de la figura 21a son todas geoméricamente semejantes y puede esperarse que los ensayos den buenos resultados si los números de Reynolds, Froude, etc., son los mismos. Sin embargo, los elipsoides de la figura 21b sólo *parecen* semejantes. En realidad sus dos ejes tienen relaciones de escala lineal diferentes y no pueden compararse de ninguna forma racional, aunque los números de Reynolds,

Froude, etc., sean idénticos. Los resultados no serán los mismos para estos elipsoides y cualquier intento de «compararlos» es una cuestión de juicio ingeniería grosero.

Figura 21. Semejanza y no semejanza geométrica de flujos: (a) semejantes; (b) no semejantes.



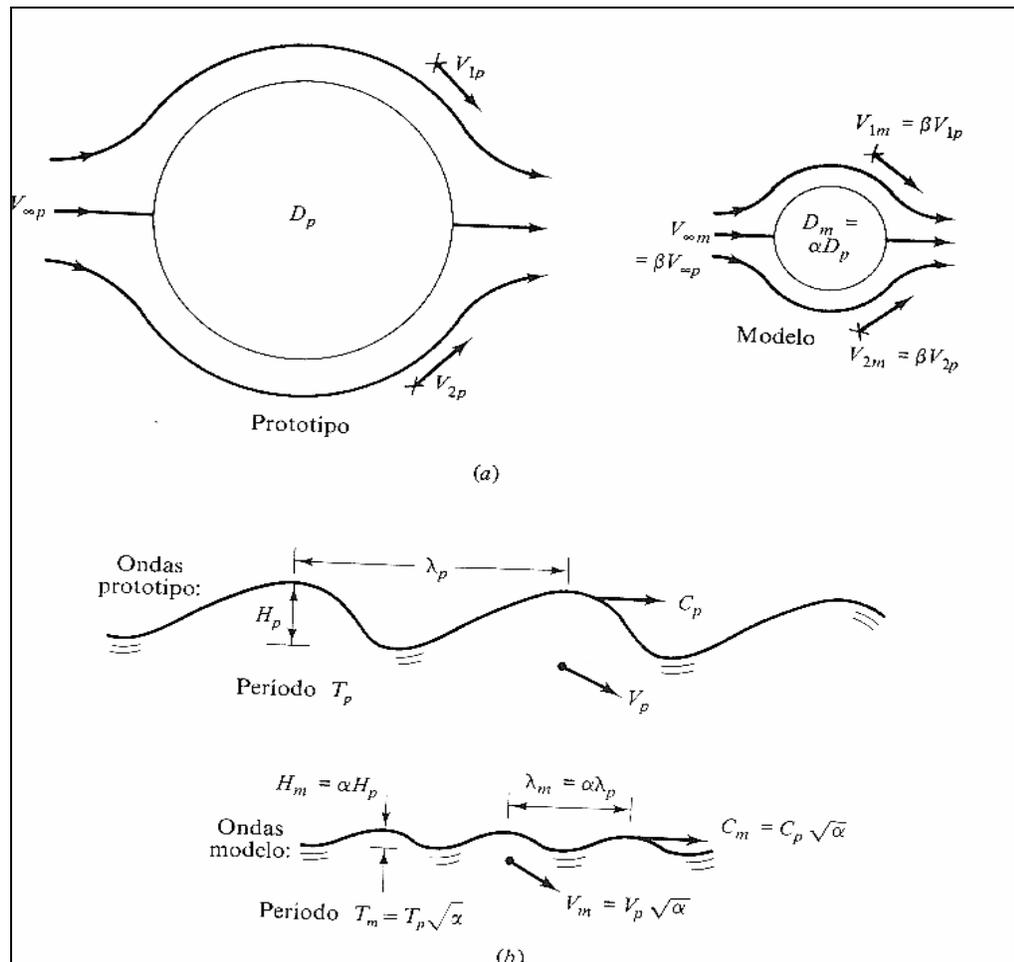
Fuente: Tomado de HUNSAKER, J. C., And RIGHTMIRE, B. G.: Engineering Applications of Fluid Mechanics, Capitulo 7, McGraw-Hill, New York, 1997.

3.3. SEMEJANZA CINEMÁTICA

La semejanza cinemática exige que todas las relaciones entre longitudes homólogas del modelo y prototipo tengan el mismo valor, relación de escala de longitudes, y también que todas las relaciones entre tiempos homólogos tengan un valor común, relación de escala de tiempos. Entonces habrá una relación única de escala de velocidades se expresa:

- Los movimientos de dos sistemas son cinemáticamente semejantes si partículas homólogas alcanzan puntos homólogos en instantes homólogos.
- La equivalencia de las escalas de longitud implica simplemente semejanza geométrica, pero la equivalencia de las escalas de tiempo puede exigir consideraciones dinámicas adicionales tales como igualdad de los números de Reynolds y de Mach.

Figura 22. Los flujos no viscosos a bajas velocidades son cinemáticamente semejantes: (a) los flujos sin superficie libre son cinemáticamente semejantes con relaciones de escala de longitud y tiempo independientes; (b) los flujos con superficie libre son cinemáticamente semejantes con escala de longitud y tiempo relacionadas por la conservación del número de Froude.



Fuente: Tomado de HUNSAKER, J. C., And RIGHTMIRE, B. G.: Engineering Applications of Fluid Mechanics, Capitulo 7, McGraw-Hill, New York, 1997.

Los flujos sin fricción con superficie libre, como el de la figura 22b, son cinemáticamente semejantes si sus números de Froude son iguales.

$$Fr_m = \frac{V_p^2}{gL_m} = \frac{V_p^2}{gL_p} = Fr_p \quad (2)$$

Obsérvese que el número de Froude sólo relaciona magnitudes con dimensiones de longitud y tiempo. De la ecuación (2), si la escala de longitud es

$$L_m = \alpha L_p \quad (3)$$

Donde α es un factor adimensional, la escala de velocidad es

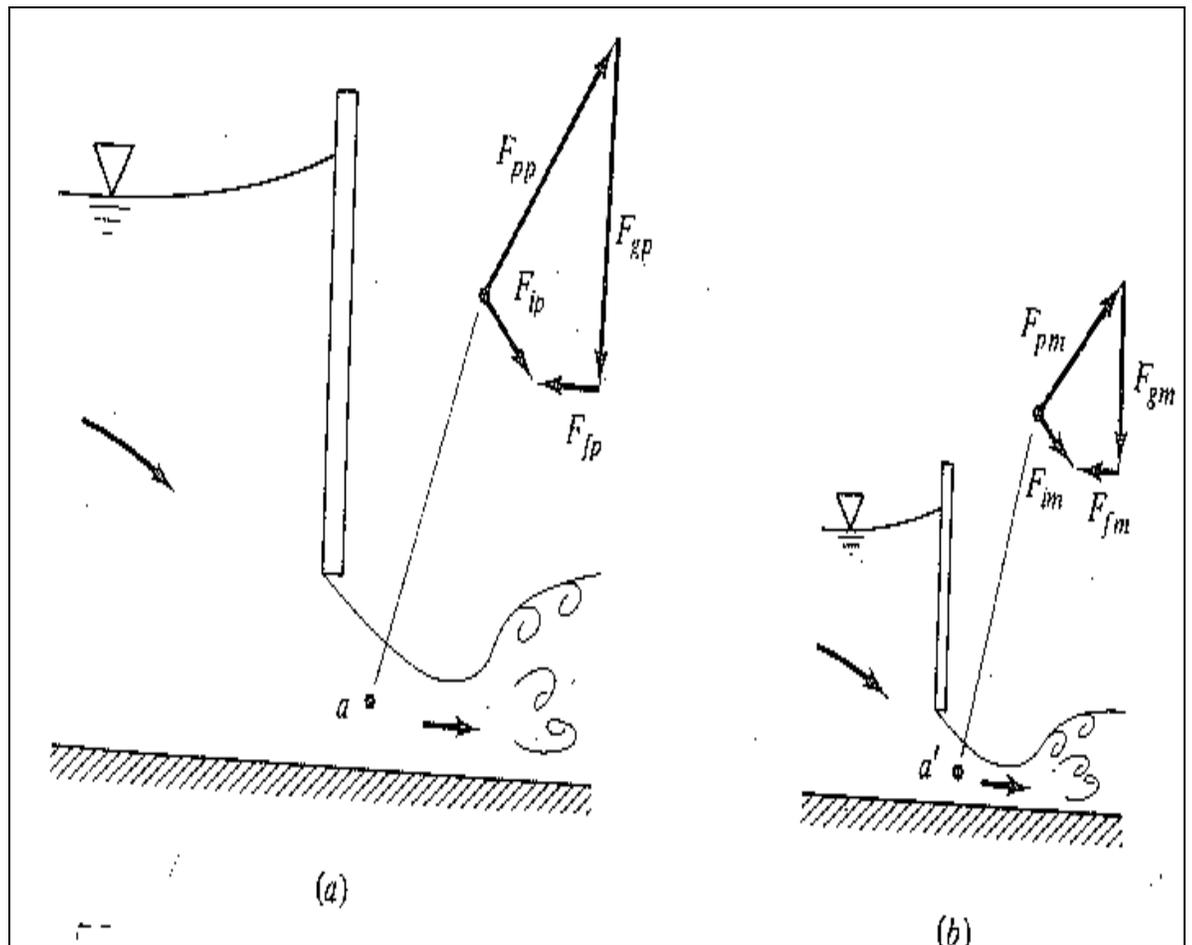
$$\frac{V_m}{V_p} = \left(\frac{L_m}{L_p} \right)^{1/2} = \sqrt{\alpha} \quad (4)$$

y la escala de tiempo es

$$\frac{T_m}{T_p} = \frac{L_m / V_m}{L_p / V_p} = \sqrt{\alpha} \quad (5)$$

Estas relaciones cinemáticas obtenidas de la igualdad de los números de Froude se ilustran en la figura 23b que se refiere a la modelización del movimiento de ondas. Si la relación de escala de longitudes de las ondas es α , la relación entre períodos de onda, velocidades de propagación y velocidades de las partículas es $\sqrt{\alpha}$

Figura 23. Semejanza dinámica en el flujo por debajo de una compuerta. El modelo y prototipo tienen polígonos de fuerzas semejantes, en puntos homólogos, si los números de Reynolds y Froude son iguales en ambos; (a) prototipo (b) modelo.



Fuente: Mecánica de fluidos. White

Si los efectos de viscosidad, tensión superficial o de la compresibilidad son importantes, la semejanza cinemática está condicionada a que haya semejanza dinámica.

3.4. SEMEJANZA DINÁMICA

Existe semejanza dinámica cuando modelo y prototipo tienen la misma relación de escala de longitudes, la misma relación de escala de tiempos y la misma relación de escala de fuerzas (o de masa). De nuevo, la semejanza geométrica es el primer requisito; en caso contrario, no se debe proseguir. La semejanza dinámica existe simultáneamente con la semejanza cinemática, si todas las fuerzas en un modelo y prototipo guardan la misma proporción. Esto ocurre si:

- Flujo compresible: los números de Reynolds y Mach y la relación de calores específicos correspondientes son iguales.
- Flujo incompresible: (a) Sin superficie libre: números de Reynolds de modelo y prototipo iguales; y (b) Con superficie libre: los números de Reynolds, Froude y (si intervienen) los de Weber y de cavitación iguales en prototipo y modelo.

Esto es consecuencia de que la ley de Newton exige que para toda partícula fluida la suma de las fuerzas de presión, gravedad y fricción ha de ser igual al término de aceleración o fuerza de inercia.

$$F_p + F_g + F_f = F_i$$

Las leyes de semejanza dinámica citadas anteriormente aseguran que todas estas fuerzas están en la misma proporción y tienen direcciones equivalentes en modelo y prototipo.

4. INSTRUMENTACIÓN

4.1. PRINCIPIOS DE INSTRUMENTACIÓN

En la actualidad es muy grande el número de instrumentos de medición y de control y aumenta día con día pues continuamente se diseñan nuevos instrumentos en todas las regiones del mundo, por lo que es prácticamente imposible describir todos estos instrumentos. Sin embargo, en este capítulo se señalan algunos rasgos característicos comunes a muchos de ellos.

Tanto para ingenieros como para científicos los instrumentos constituyen un medio y no un fin, por lo que no siempre es necesario ni ventajoso que tengan un profundo conocimiento de los mismos, aunque sí es deseable que tengan una comprensión general de los principios básicos del funcionamiento de los instrumentos que requieren en su trabajo.

4.2 INSTRUMENTOS

La palabra instrumento por lo general se usa para indicar cualquier dispositivo útil para ciertos fines, pero los instrumentos científicos y técnicos son dispositivos para observar, medir, controlar, registrar, calcular y comunicar.

En el curso de sus investigaciones del universo el hombre ha ideado gran cantidad de instrumentos: algunos de éstos, como el microscopio y el telescopio,

perfeccionan y prolongan el alcance de las facultades y capacidades humanas para percibir, comunicar, calcular, recordar, razonar, etc.; otros instrumentos como el magnetómetro y el contador de rayos cósmicos miden magnitudes físicas para las cuales no existe un sentido en los seres humanos capaz de detectarías; otros como la cámara, el simulador y la computadora realizan funciones de almacenamiento, transmisión y procesamiento de la información en forma análoga al hombre, pero con una eficiencia mayor. Esta actividad creadora sirvió primero para controlar su entorno, después para modificarlo y luego para enriquecerlo agregándole lo que no existía.

4.3. CLASES DE INSTRUMENTOS

Los instrumentos se pueden clasificar de acuerdo con el campo de aplicación, así se habla de instrumentos de oceanografía, de navegación, de topografía, etc. Pero también se pueden clasificar de acuerdo con su función, teniéndose entonces instrumentos de detección, de control, de medición, de registro, etc. Algunos prefieren clasificarlos en función de la variable por medir o controlar, cuando se habla de instrumentos de presión, de temperatura, de fuerza, de viscosidad, etc.

Otro criterio para clasificar los instrumentos, de amplia aplicación es el que toma en cuenta el principio de operación. Se habla entonces de instrumentos mecánicos, eléctricos, neumáticos, ópticos, nucleares, electrónicos, etc.

Hay que considerar que cada clasificación es útil en determinadas condiciones, ya que un instrumento o un sistema de medición requiere para su funcionamiento la

combinación de diferentes principios de operación, además de que se puede aplicar en gran variedad de condiciones y que en general cualquier variable física se puede medir con una gran diversidad de instrumentos. De esto se deduce que no hay un solo criterio para clasificar los instrumentos, y cuando se utiliza determinada clasificación es porque ésta resulta la más conveniente en ese momento. Por ejemplo; para cierto experimentador podría ser útil clasificar los instrumentos en:

- Instrumentos ciegos. Los que no tienen indicación visible de la variable. Ejemplos de este tipo de instrumentos son los termostatos, los transmisores de caudal, los instrumentos de alarma como presóstatos y termostatos, etc.
- Instrumentos indicadores. Pueden ser analógicos o digitales. Los primeros disponen de un índice y una escala graduada en que se puede leer el valor de la variable medida o controlada, como es el caso del manómetro de Bourdon; los segundos muestran la variable en forma numérica con dígitos en una pantalla. Un ejemplo de este tipo de instrumentos lo proporciona el cronómetro digital.
- Instrumentos registradores. Son los que registran la variable medida o controlada con trazo continuo o puntos. En estos instrumentos se emplea una pluma que opera mecánica o neumáticamente para dibujar la gráfica en el papel para gráficas. Este puede ser circular o rectangular. Ejemplo de este tipo de instrumentos es el que se utiliza en meteorología para registrar las variaciones de temperatura durante el día.

Los diversos criterios para clasificar los instrumentos tienen ventajas y limitaciones. La preferencia de uno de ellos depende de las normas de la compañía o laboratorio para el cual se trabaja, de los objetivos, intereses y conocimientos del experimentador, y de la situación particular de la investigación.

4.4 SISTEMAS DE MEDICIÓN

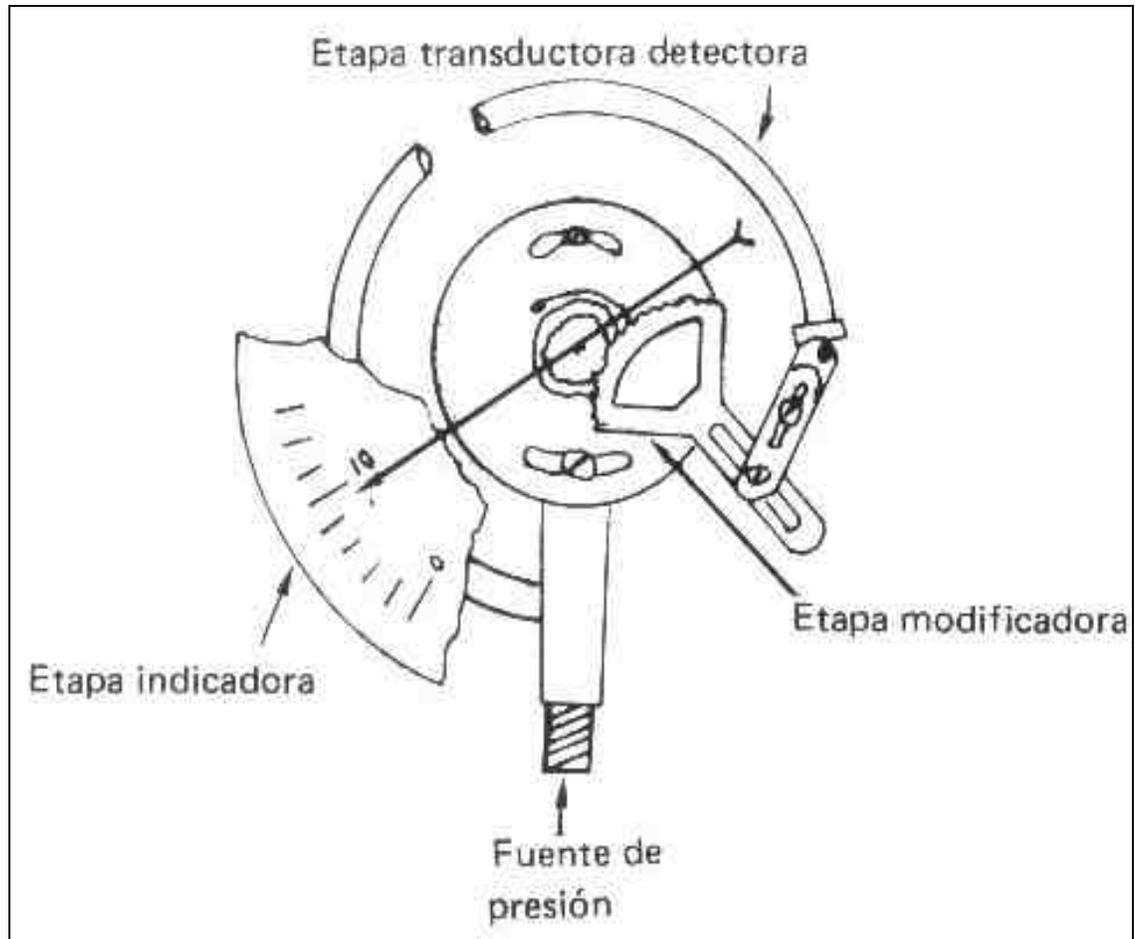
Los sistemas de medición incluyen en general tres elementos básicos:

- Un elemento sensor que detecta la variable física que se va a medir. Este elemento debe responder sólo a cambios de la variable por medir. Por ejemplo, un sensor que responde a variaciones de temperatura no debe detectar cambios de presión, de vibraciones o cualquier otra variable. Los sensores son útiles para cierto rango de la variable por medir, por lo que se manufacturan cientos de ellos para diferentes rangos y condiciones de operación. En muchos sistemas de medición no tan sólo se detecta la variable por medir sino que, además, se le transforma en otra variable más manejable. Cuando un elemento transforma la variable que detecta en otro tipo se denomina transductor. La mayoría de los transductores transforman la variable física en una señal eléctrica, ya que ésta es la forma de señal que más fácilmente se controla y mide.

- Un elemento intermedio que modifica la señal del sensor o del transductor para tener una señal de salida conveniente. Por ejemplo, en el caso de una señal de salida eléctrica puede ser conveniente una ampliación de la misma antes de que se indique o registre.

- Un elemento terminal en que se indica o registra el valor de la variable medida. Este elemento es un dispositivo que convierte la señal de salida del elemento intermedio en un valor numérico o registro que el experimentador puede utilizar.

Figura 24. Manómetro de tubo Bourdon.



Fuente: Enciclopedia Encarta. Microsoft Corporation

Como en la figura 24, muestra un ejemplo de sistema genérico de medición se tiene al manómetro de Bourdon en que el tubo de Bourdon representa en si mismo el transductor porque convierte la señal de presión en un desplazamiento

mecánico del tubo. El engranaje constituye la etapa intermedia que amplifica el desplazamiento. Finalmente, el elemento terminal consistirá en una carátula y una aguja que cuando se calibra el manómetro da una indicación de la señal de presión que se ejerce en el tubo de Bourdon.

4.5 CALIBRADO DE INSTRUMENTOS

La calibración de un instrumento es un proceso importante por que permite verificar dicho instrumento con respecto a un estándar conocido. Mediante la calibración se reducen los errores en las mediciones. El calibrado implica una comparación del instrumento en particular con:

- Un estándar o patrón primario.
- Un patrón secundario con una exactitud más alta que la del instrumento por calibrar.
- Una excitación o fuente de señal de entrada conocida.

Con la calibración se establece firmemente la exactitud de los instrumentos, por lo que antes de aceptar la lectura de un instrumento es conveniente realizar una simple verificación de la calibración para estar seguro de la validez de las mediciones que se hagan con dicho instrumento. Es esencial que después de haber calibrado un instrumento de medición se pruebe con el fin de determinar sus errores y para averiguar si cumple con la especificación prescrita.

4.6. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS EN INSTRUMENTACIÓN

Los instrumentos de medición y de control que se emplean en los laboratorios de investigación e industrias como la energética, química, textil, petroquímica, etc. tienen su propia terminología; los términos que se utilizan definen las características propias de medida y control de los diversos instrumentos. El conocimiento de esta terminología permite al experimentador emplear el mismo lenguaje que fabricantes y entidades que intervienen directa o indirectamente en el campo de la instrumentación. Por ello, a continuación se definen algunos de los términos que se usan en la especificación de instrumentos.

- Campo de medida. Es el espectro o conjunto de valores de la variable que se mide comprendido dentro de los límites superior e inferior de la capacidad del instrumento. Por ejemplo el campo de medida de un termómetro clínico es de 35-41° C.
- Alcance. Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento. Por ejemplo, el valor del alcance de un termómetro clínico es de 6°C
- Zona muerta. Es el campo de valores de la variable que no altera la indicación de salida del instrumento. Se expresa en tanto por ciento del enlace de la media. Por ejemplo, en el termómetro clínico es de $\pm 10\%$, es decir, de $\frac{10 \times 6}{100} = \pm 0.60$ C
- Repetibilidad. Es la capacidad de reproducción de las posiciones del índice del instrumento al medir repetidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de operación.

- Fiabilidad. Es la medida de la probabilidad de que un instrumento se siga comportando dentro de los límites especificados de error en condiciones específicas y a lo largo de un tiempo determinado.
- Estabilidad. Capacidad de un instrumento para mantener su comportamiento durante su vida útil y de almacenamiento especificadas.
- Temperatura de servicio. Es el campo de temperaturas en que se espera que trabaje el instrumento dentro de los límites de error especificados.
- Vida útil de servicio. Es el tiempo mínimo especificado durante el cual las características de servicio del instrumento no presentan cambios en su comportamiento más allá de las tolerancias especificadas.
- Ruido. Es cualquier perturbación no deseada que modifica la transmisión, control, indicación o registro de los datos que se desean.
- Respuesta frecuencial. Variación con la frecuencia de la relación de amplitudes señal de salida / variable medida (y de la diferencia de fases entre la salida y la variable medida) para una medida de variación senoidal aplicada a un instrumento dentro de un campo establecido de frecuencia de la variable que se mide. Por lo regular se especifica como « dentro de \pm - -% de - -a - - HZ»
- Índice. Parte fija o móvil de un instrumento indicador cuya posición con referencia a los trazos de la escala permite determinar un valor indicado.
- Escala. Conjunto ordenado de trazos con una numeración asociada, formando parte de un instrumento indicador.

- Amplitud de escala. Para una escala dada, es la gama de valores comprendida entre los trazos extremos de la escala. La amplitud de la escala se expresa en las unidades marcadas sobre la escala.
- Escala lineal. Escala en la cual la longitud y el valor de cada división están relacionados por un coeficiente de proporcionalidad constante a lo largo de la escala.
- Carátula. Parte del instrumento indicador, fijo o móvil, que contiene una o varias escalas.
- Valor nominal. Valor utilizado para designar una característica de un dispositivo o para servir de guía durante su utilización prevista. Es el valor marcado en el cuerpo de los resistores.
- Tiempo de respuesta. Intervalo de tiempo comprendido entre el momento en que una señal de entrada sufre un cambio brusco específico y el momento en que la señal de salida alcanza dentro de los límites especificados, su valor final en régimen estable y sostenido.

4.7. ESPECIFICACIÓN DE SENSORES

Todos los instrumentos deben ser especificados a un punto tal que aseguren la operación del proceso y que permita la estimación de sus costos. Estas especificaciones se pueden sistematizar, aplicándolas tanto a sistemas sensores como a sistemas actuadores, sin que todas y cada una de las definiciones que siguen

a continuación sean aplicables a todo sensor o actuador. Sin embargo, las definiciones conforman parte del léxico básico del proyecto de instrumentación.

- Precisión (O Exactitud): Todo sistema sensor responde a un principio físico, químico o biológico que permite su funcionamiento. Por ende, todo sistema sensor tendrá limitaciones que serán inherentes a sus principios. Una de tales limitaciones es la precisión, que regula el margen de imprecisión instrumental. Por ejemplo, dado un sistema de medición de temperatura, de precisión $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$, cuando su lectura fuese de $37,2^{\circ}\text{C}$ significa que la temperatura del ambiente medido está entre $37,15$ y $37,25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Habitualmente, la precisión se expresa como porcentaje de la escala completa. Por ejemplo, un termómetro cuyo tope de escala fuese 100°C y de precisión $0,5\%$ significa que toda lectura de $T\text{ }^{\circ}\text{C}$ estará sujeta a una imprecisión de $0,5^{\circ}\text{C}$ (si se mide $37,2^{\circ}\text{C}$, la temperatura estará entre $36,7$ y $37,7\text{ }^{\circ}\text{C}$).

La precisión está asociada al cálculo de la desviación estándar del instrumento o de un procedimiento analítico.

- Error: Expresa la diferencia entre la magnitud medida y la lectura instrumental. En toda aplicación se desearía que el error fuese 0; sin embargo, todos los instrumentos modifican su comportamiento a lo largo de su vida y es común calibrarlos de cuando en cuando. Un instrumento tan sencillo como un termómetro de mercurio se debe calibrar para corregir el error. Por ejemplo, si un reactor está a 70°C y el instrumento lee 69°C , el error será de -1°C .

El error se define, habitualmente, como Lectura-Valor real; si bien podría usarse a la inversa sin mayores confusiones, con tan sólo especificar que opción se usa.

- Error De No Linealidad: Los instrumentos ideales son lineales. De hecho, la mayoría de los sistemas instrumentales comerciales tienen respuesta lineal. Puede ocurrir, sin embargo, que la respuesta no sea estrictamente lineal y, por ende, que ocurra un error por no linealidad de la respuesta del instrumento.

Un caso típico que conviene tener en cuenta es el de los electrodos y medidores de pH. Como es sabido, la escala de pH resulta lineal pues el potencial de Nernst generado corresponde al logaritmo negativo de la concentración molar de hidrógeno ionizado (H^+). A pesar de la sólida definición que sustenta la linealidad del medidor y de la electrónica utilizada para la amplificación, los sistemas (electrodo más medidor) de medición de pH sufren de no linealidades y, en realidad, la relación entre el pH de la solución y el pH medido es más bien como indican los puntos (circulitos) que como la línea sólida (hipotética respuesta lineal) de la figura a continuación.

- Reproducibilidad: Se refiere a la capacidad del instrumento de mantener una misma lectura cuando el valor de la especie sensada está a valor constante. También se utiliza este término para describir la capacidad de entregar el mismo valor medio y desviación estándar al medir repetidamente un mismo valor.

- Sensibilidad: Término utilizado para describir el mínimo cambio en la especie sensada que el instrumento puede detectar. Su definición es similar a la definición de ganancia pero se refiere, más bien, a la posibilidad de discriminar dos valores muy cercanos entre sí. La sensibilidad se expresa cuantitativamente mediante la tasa de cambio de la medición respecto del cambio en la especie sensada.

Es común (pero erróneo) asociar la sensibilidad a la escala de lectura; p.e. si una escala de temperatura tiene divisiones cada un grado centígrado, se podría pensar que la sensibilidad fuese de $\frac{1}{2}$ grado porque no sería posible "estimar" valores como $\frac{1}{4}$ de grado. En realidad, es posible que el sistema termómetro en uso necesite un cambio de un grado antes de modificar su aguja indicadora.

- Resolución: Se refiere, precisamente, al contra ejemplo anterior. Expresa la posibilidad de discriminar entre valores, debido a las graduaciones del instrumento. Se suele hablar de número de dígitos para indicadores numéricos digitales y de porcentaje de escala para instrumentos de aguja. Es bien sabido, por ejemplo, que los termómetros de baja calidad sólo tienen indicaciones cada 10 °C, sin subdivisiones, a fin de enfatizar al usuario que el instrumento sólo da una noción y no se debe usar como instrumento de alta resolución. La resolución está en directa relación a la escala del instrumento.

- Rango: Expresa los límites inferior y superior del instrumento. Por ejemplo, los sistemas de medición de pH suelen ser de rango 0 a 14 (aún cuando la "escala" conceptual de pH puede exceder este rango; pero, en soluciones que no llamaríamos "acuosas").

- Rango De Trabajo O De Operación: Muchos instrumentos, sobre todo los industriales, permiten definir subrangos de su rango intrínseco, típico de medidores de pH, subrangos de 0 a 1,4; de 1 a 2,4; de 2 a 3,4; etc. El rango de trabajo mejora la resolución pero no necesariamente la sensibilidad.

- Banda Muerta: Los instrumentos suelen ser insensibles a muy pequeños cambios, porque su sensibilidad así lo impone. Este mismo concepto puede ser visto a la inversa, especificando, en cambio, la banda (en el sentido de espacio) muerta del instrumento, es decir, cuan grande debe ser el cambio de la especie sensada para que el instrumento reaccione. Este término también se aplica a los rangos de valor de la especie sensada para los que el instrumento no responde; p.e. temperaturas debajo o sobre el rango de un termómetro.

- Corrimiento Del Cero: La lectura en cero suele cambiar por razones asociadas al uso de un instrumento o porque las etapas amplificadoras sufren de deriva en el tiempo (como, por ejemplo, la línea base de un cromatograma). Los instrumentos deben especificar su tolerancia al corrimiento del cero y, además, los procedimientos y periodicidad de recalibraciones. Un caso muy típico es el cero de la escala de pH (la concentración molar de H^+ es igual a la de OH^- a pH 7,00) que se debe recalibrar frecuentemente.

- Tiempo De Respuesta: La medición de cualquier variable de proceso puede implicar una demora, (debida a fenómenos de equilibrio, transporte, etc.) que debe ser definida adecuadamente. Si la medición tiene una cinética más lenta que la de la propia variable, habrá que disponer de sistemas complejos de predicción del valor en lugar de descansar sólo sobre la medición instrumental. Los tiempos de respuesta se definen en base al tiempo necesario para obtener una medida que corresponda al 96% (o cualquier otro porcentaje) del valor final. Los electrodos de pH comunes, por

ejemplo, tienen tiempos de respuesta del orden 5 segundos; pero existen electrodos de mejores tiempos de respuesta (electrodos de "Ross"), del orden de un segundo.

-Histéresis: Algunos instrumentos presentan un fenómeno de "memoria" que impone un histéresis a su respuesta. En particular, un sistema de medición de presión podría indicar los cambios de presión según si la presión anterior era más alta o más baja que la actual, debido a fenómenos de resistencia viscosa al desplazamiento de partes interiores del sensor. Así, una presión de 3 p.s.i.g., por ejemplo, podría leer 3,1 si la presión acaba de bajar, pero 2,9 si esta ha subido. El diagrama tradicional de las respuestas con histéresis consiste de dos curvas, en lugar de la línea recta hipotética.

- Función De Transferencia: Un instrumento se puede caracterizar formalmente mediante su función de transferencia, es decir, por su modelo matemático Entrada/Salida, donde la entrada es el valor real de la propiedad sensada y la salida es la lectura en el instrumento. Por descontado, toda ganancia deberá ser unitaria; pero tanto la forma dinámica de la respuesta (si oscila, por ejemplo) entre cambios como el tiempo de respuesta pueden ser importantes para la aplicación que se esté diseñando. Las funciones de transferencia de instrumentos de alta calidad suelen estar disponibles desde el fabricante. De no ser tal el caso, esta se deberá construir mediante el análisis dinámico clásico (según se analiza en el trabajo de laboratorio del curso, puede ser útil, también, recordar la respuesta dinámica del transductor diferencial de presión ya analizado).

4.8. REGISTRO DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

Para realizar los registros de un trabajo experimental es necesario conocer los siguientes tópicos con el fin de presentar de una manera lógica y ordenada los resultados del experimento.

4.8.1. Introducción al registro experimental. El científico y el ingeniero tienen como todo ser humano la necesidad de dar a conocer el saber y sus resultados a los demás y a la vez recibir de ellos el fruto de su trabajo. Mediante la comunicación científica se agranda cada día el saber y, con este cimiento el hombre está en condiciones de emprender nuevas investigaciones y el desarrollo de otros procesos y productos que al ser conducidos en forma científica permitirán seguir la construcción de la ciencia y el desarrollo de la técnica. Considerando que la comunicación es una de las actividades fundamentales de técnicos y científicos, en este capítulo se señala la importancia y características que debe tener un buen reporte del trabajo experimental, así como las sugerencias para el registro permanente en un cuaderno de la investigación o trabajo realizado, como para la elaboración del informe respectivo.

4.8.2 Cuaderno de laboratorio. En un experimento se debe registrar a diario el curso del mismo porque la memoria humana es incapaz de asimilar todo el trabajo hecho. Toda la información, trabajo, o idea se deberá registrar permanentemente en un cuaderno. Esto servirá no sólo para enlistar las observaciones, sino

también para describir todos los aspectos del trabajo experimental, porque éste es esencialmente de exploración y en realidad no se sabe qué información puede ser necesaria más adelante.

Se debe recordar que uno de los principios fundamentales del trabajo de laboratorio es el de que otra persona con igual preparación, siguiendo las notas del cuaderno, debe ser capaz de reproducir el experimento. Esa persona puede ser el mismo autor que al mes o al año quiera reproducir la experiencia.

No hay que fiarse de la memoria para completar detalles. Todo debe estar registrado en un cuaderno. Jamás se deben registrar las observaciones en un trozo de papel, ya que se corre el riesgo de perderlo junto con información que puede ser de valor.

Si el trabajo experimental lo debe continuar otro, es importante la correcta organización de las notas en el cuaderno. Las distintas partes de la experiencia han de estar separadas por encabezamientos adecuados. Los datos deben aparecer en orden cronológico. Se debe tener presente que el cuaderno del laboratorio no es un informe que se ha de preparar después de la experiencia sino que es un registro paso a paso de lo que se está realizando.

Un registro claro y sistemático de un experimento es tan importante como el propio experimento, por lo que el formar en el estudiante el hábito de hacer en un cuaderno registros permanentes de sus observaciones e ideas en los inicios de los estudios profesionales será de mucho provecho en el ejercicio de su profesión.

4.8.3 Sugerencias Para El Registro

4.8.3.1 Encabezamiento. En el registro del trabajo experimental diario en la primera página del cuaderno del laboratorio debe aparecer el nombre del experimento y la fecha.

4.8.3.2. Objetivo. Cada vez que se inicie un nuevo experimento se debe registrar en forma clara y concisa el objetivo que se persigue.

Esto permite aclarar el problema a quien lo desarrollará y a quien repetirá el experimento.

4.8.3.3. Registro de mediciones. Todas las medidas se deben registrar inmediata y directamente. No se deben efectuar operaciones mentales y registrarlas en el cuaderno, porque si se comete una equivocación en la operación aritmética mental nunca se podrá corregir.

Al efectuar y anotar una medición conviene volver a mirar el instrumento de medición para verificar lo registrado. De modo que *LEA, ESCRIBA Y COMPRUEBE.*

Si escribe un número incorrectamente, no la repinte; siempre existe la posibilidad de descifrar erróneamente un número repintado. Tache siempre el número incorrecto y anote al lado el correcto.

4.8.3.4. Instrumentación. Es necesario anotar el número de serie de los instrumentos que influyen directamente en la precisión de los datos o de los aparatos clave que se hayan usado en las mediciones. Si el fabricante no les asignó número de serie, se les deberá dar. Esto permite localizarlos si se desea repetir las lecturas al analizar los resultados. Para ubicar exactamente la posición de los instrumentos es indispensable establecer alguna forma de indicación que muestre cómo estaba conectado en el arreglo experimental.

4.8.3.5. Procedimiento. En general no se requieren largas explicaciones acerca del procedimiento seguido. Basta con algunos comentarios al margen de los datos y de las figuras. Sin embargo, hay que anotar los detalles clave de la forma en que se va desarrollando la experiencia que permitan reproducirla después.

4.8.3.6 Diagramas. Los diagramas, junto con algunas explicaciones, son a menudo la forma más fácil y efectiva de explicar el principio de un experimento y de describir un equipo. Un diagrama no debe ser una representación artística ni fotografía del aparato; debe ser esquemático y sencillo e indicar sólo los aparatos que son pertinentes para el experimento.

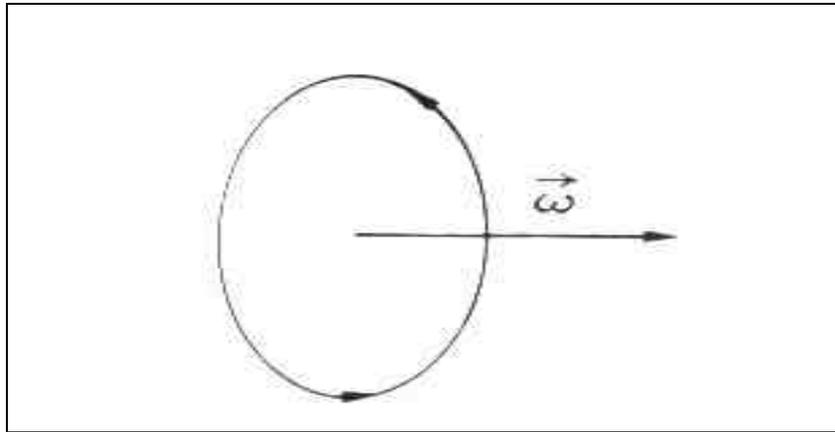
El título del diagrama debe ser lo más claro y completo posible. En algunas ocasiones no conviene incluir en el diagrama datos numéricos.

Se debe dibujar el circuito del experimento de modo que se pueda reproducir fácilmente en el futuro. Hay que señalar cualquier modificación introducida en el circuito durante el experimento.

Por lo general un diagrama es la mejor forma de representar convenciones de signos. La figura 25, muestra la convención que se utiliza para representar una rotación por medio de un vector. Expresar esto en palabras no sólo es más difícil sino menos efectivo.

4.8.3.7. Tablas. Las mediciones se deben registrar en forma tabular siempre que sea posible. Las tablas tienen las ventajas de ser compactas y fáciles de seguir. Si el objeto de las tablas es proporcionar en forma sintética datos, es recomendable su uso para exponer una serie de detalles específicos (por ejemplo, variaciones de temperatura), o para mostrar la relación entre dos o más variables de un experimento, (por ejemplo, la relación entre la corriente eléctrica y el voltaje aplicado a un conductor óhmico). No se recomienda su uso para repetir exactamente la información expuesta en el texto.

Figura 25. Diagrama que muestra la convención para representar una rotación por medio de un vector.



Los aspectos más importantes que se deben considerar en la organización de las tablas son su sencillez y uniformidad. Para obtener esto, hay que tener presente al lector que quiera repetir el experimento. Algunos de los elementos que deben figurar en una sola tabla son:

- El número de la tabla.
- Su título.
- Las cabezas de las columnas, o sea los títulos que identifican las columnas verticales.
- El campo, es decir las columnas de los datos.

En virtud de que las tablas se deben presentar con la mayor sencillez posible, se recomienda que las mediciones de la misma magnitud se registren en las columnas verticales. En la cabeza de la columna no sólo se debe registrar el nombre de la magnitud sino indicar también la unidad en que se midió. Una vez

que la unidad se ha especificado en la cabeza de la columna no es necesario repetirla después de cada medición. También es conveniente que los números que se registren estén aproximadamente en el rango de 0.1 a 1,000, para lo cual se utiliza la conveniente potencia de 10 de la unidad como se muestra en figura 26.

Figura 26. Tabla 1. Modulo de Young.

MATERIALES	Y (10" N.m-2)
Aluminio	.70
Cobre	1.25
Níquel	2.1
Hierro	2.06

Las tablas deben contener absolutamente toda la información que sea necesaria para interpretar sus datos.

4.8.3.8. Gráficas. Una manera de presentar los datos de modo que se observen los resultados al variar uno o más parámetros es mediante una gráfica.

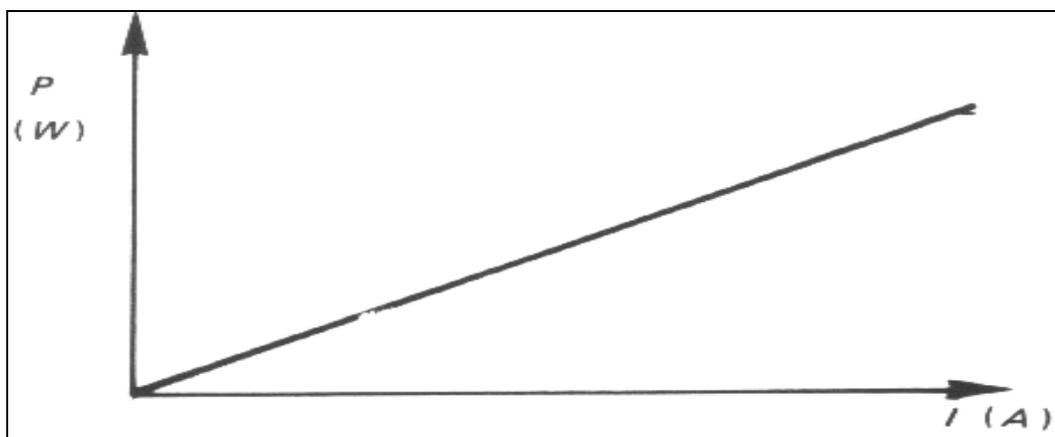
Las gráficas son de gran utilidad pues permiten representar numerosos datos en forma visual concisa. Las gráficas se deben hacer en el laboratorio, ya que al constatar la presencia de valores dudosos durante el experimento se puede corregir al tener montado el arreglo experimental. Las gráficas se deben trazar en

papel adecuado (milimétrico, semilogarítmico o polar, etc.), por lo que conviene disponer de una minuciosa selección de papeles gráficos, además del cuaderno de notas.

En cada gráfica se han de distinguir claramente las curvas del rayado del papel, así como los puntos que representan las diversas observaciones. Además debe tener un encabezamiento descriptivo breve como el que se muestra en la figura 27, (potencia de la carga en función de la corriente).

4.8.3.9. Cálculos. En este punto se debe ser específico, es decir que el encabezado se debe iniciar como "Cálculo de la aceleración de la gravedad correspondiente a los datos de la Tabla No. X", pero no con el título de "Cálculos". Es importante que se incluyan en el cuaderno los cálculos, ya que después, en la elaboración del informe y en el análisis de los resultados, puede ser necesario contar con los resultados intermedios.

Figura 27. Potencia de la carga en función de la corriente



Es conveniente registrar las unidades con que se haya medido una la cantidad. Por ejemplo, decir que la masa de un objeto es 10 no significa nada. Las cantidades que se midan se deberán registrar en las unidades del instrumento con que se haya efectuado la medición. Si una longitud se mide con un tornillo micrométrico graduado en milímetros y la lectura que se obtiene es 2.43 se registrará la medida como 2.43 mm. Cuando se requiera se podrá convertir la lectura obtenida a otro sistema de unidades.

4.8.3.10. Conclusiones. En el cuaderno de laboratorio merece particular atención la anotación de las conclusiones. Aquí es donde se deben interpretar los resultados evitando casos como este: "Se comparó el multímetro con el voltímetro patrón y se encontró que es exacto dentro del error experimental".

Esto es inconveniente en parte porque la frase "exacto dentro del error experimental" es vaga y puede significar diversas cosas para distintas personas, pero principalmente porque no se ha dado la prueba de la afirmación. Lo que se debe anotar es algo parecido a lo siguiente:

Calibración del multímetro TWK 500

Multímetro (26.1 t 0.2) V

Voltímetro patrón 26.0V

Conclusión: El error del multímetro es despreciable con respecto al valor obtenido por el voltímetro patrón.

Como se ve, en las conclusiones figuran explicaciones de los resultados, además de propuestas de nuevos experimentos y comentarios generales. Las conclusiones deben ser breves pero completas.

4.8.3.11. Bibliografía. En el cuaderno de laboratorio se debe anotar el material de referencia utilizado para realizar el experimento, ya que puede ser necesario referirse después a dicha bibliografía.

4.9. REPORTE DEL LABORATORIO

Como la elaboración de informes es una de las principales actividades de ingenieros y científicos, es necesario que durante su formación se les brinde la oportunidad de desarrollar esta habilidad, la cual puede tener una influencia decisiva en su carrera profesional, ya que independientemente del éxito de un experimento o lo brillante que resulte algún proyecto, éste puede ser de poco valor si la información no se transmite en forma adecuada. Además, el reporte escrito es el medio usual de comunicación tanto en el ambiente científico como tecnológico, ya sea que circule internamente en una empresa, institución de enseñanza o que se publique a nivel nacional o internacional.

En la preparación y elaboración del informe escrito es indispensable tomar en cuenta que de acuerdo con su calidad se juzgará el trabajo o proyecto realizado. Así, hay que redactarlo con el mismo cuidado que se haya puesto en el proyecto o

experimento, pues sería una lástima estropearlo con un informe posterior descuidado. Aquí es donde radica la importancia de escribir un buen informe y de presentar la información de manera pulcra, precisa y clara.

Los científicos, como los ingenieros, desde la entrevista de su primer empleo y durante el ejercicio de su profesión hasta el discurso de retiro dedican un tiempo mayor a la comunicación oral y escrita que a otras actividades de su profesión.

Es por esto que, durante su educación, se debe buscar un incremento en el desarrollo de estas capacidades que les permita un rendimiento eficiente en este aspecto tan importante de su futuro trabajo.

Aunque poca gente tiene capacidad natural para la comunicación cualquiera con la práctica puede mejorarla hasta un alto grado, siempre y cuando reflexione en el efecto que cada palabra, frase y párrafo tienen en el lector o el auditorio.

4.10. ESTILO

El estilo es la forma mediante la cual los pensamientos se expresan en la escritura, pero para nuestros propósitos el estilo no tan sólo importan las palabras que se usen y la composición de las oraciones sino también la presentación del trabajo como un todo. Aunque uno de los objetivos de estas notas es desarrollar en el lector un "buen estilo" en la escritura de informes, es difícil establecer exactamente lo que quiere decir con esta frase.

Sin embargo, se dice por ejemplo que un científico tiene buen estilo si el

significado y los resultados de su trabajo se comunican al lector de manera clara e interesante. Cuando un argumento se presenta con buen estilo el lector por lo general está predispuesto a aceptar el punto de vista del escritor.

El estilo de escritura de un ingeniero o científico se modela no tan sólo con los conocimientos y experiencia sino también con las palabras y estructuras usadas en otros reportes, pues inconscientemente se emplean frases y construcciones de esos trabajos considerados como modelos. Aquí es necesario recalcar que un ingrediente esencial para desarrollar un buen estilo es el uso correcto del lenguaje, pues hay que considerar que el eslabón entre el escritor y el lector son las palabras mismas, es decir que no sólo hay que considerar las reglas gramaticales del español sino la selección de las palabras y la composición de las oraciones para decir exactamente lo que uno se propone de manera concisa y agradable, con un estilo propio.

4.11. PRINCIPIOS GENERALES

Esta sección contiene algunas observaciones que pueden ayudar al estudiante en la escritura de reportes científicos y tecnológicos. Se ha intentado ser muy general, pero se ilustra específicamente considerando el trabajo experimental.

Una de las cualidades esenciales en la escritura es la claridad tanto en la exposición como en la estructura. La claridad en la exposición es la que hace que el lector entienda exactamente lo que el autor del escrito expresa en cada frase y en cada párrafo. La claridad estructural se consigue cuando el reporte se escribe

en secuencia lógica, el decir, que en la expresión no existen cambios bruscos al pasar de una sección a otra, sino que se lleva al lector a través del argumento por pasos lógicos y pausados que van desde la primera frase hasta las conclusiones finales.

Se ha aceptado internacionalmente que los informes se redacten en forma impersonal y en tiempo pretérito, porque se considera que así se puede lograr mayor objetividad que resalte el experimento o proyecto y no al experimentador proyectista. Pero en algunas ocasiones se puede utilizar la primera persona para destacar un punto vista del autor o para recalcar el hecho de que una proposición principalmente la opinión de quien escribe. Otro estilo que se emplea en la escritura científica es la voz pasiva.

Para escribir un buen repone es fundamental que durante la elaboración del mismo se esté pensando todo el tiempo en el lector al que va dirigido. Es decir, el autor debe adaptarse al estilo, a la terminología, a los intereses y al nivel de conocimientos de sus principales lectores.

Algunas veces, cuando el reporte está dedicado tanto a científicos como a no científicos, se debe tener mucho cuidado en su elaboración a fin de que sea útil a ambos tipos de lectores.

Los estudiantes deben redactar los reportes de laboratorio pensando en que el lector será otro estudiante con el mismo nivel de conocimientos y con iguales características.

La elaboración de un reporte no se debe considerar un fin sino un medio para

comunicar los resultados, experiencias o ideas del autor. El reporte tiene un objetivo bien definido, el cual va a determinar su forma y estilo. Con frecuencia se redactan malos reportes cuando el escritor se preocupa por ajustarlos al estilo de una revista científica o tecnológica; es decir, cuando su interés consiste en ver qué tanto se ajusta a "dos gráficas, tres tablas, 1,000 palabras" olvidando que la función principal de los reportes es transmitir información.

Antes de iniciar la redacción de un reporte o artículo es necesario que el autor lea el folleto con instrucciones para los autores de la revista o empresa (Si es que existe), a fin de que se ajuste al estilo general de los artículos y reportes.

4.12. ELABORACIÓN DEL REPORTE

Una de las características de un buen reporte es la correcta planeación y organización. Por lo tanto, es básico que se organice y planee, y para ello se sugiere elaborar un bosquejo que lo delimite y que señale los pasos por seguir. Son muy pocos los científicos y tecnólogos que redactan buenos reportes sin antes haber hecho un bosquejo del mismo. Por lo general cuando los estudiantes van a redactar un informe, al principio no se preocupan por mantener un balance entre el contenido y el escrito, lo que provoca largos informes que sería posible reducir sin sacrificios de claridad y contenido. Las siguientes sugerencias garantizarán una mayor probabilidad de elaborar un buen reporte.

- Señalar los objetivos del experimento o proyecto, así como las razones del reporte escrito.

- Hacer un bosquejo de los puntos que se deben tratar, así como su secuencia en el reporte.
- Incluir la información necesaria para que se pueda comprender el experimento o proyecto.
- Ampliar o reducir el número de puntos que se traten en cada sección del reporte para buscar un equilibrio, procurando evitar que por esto se pierda concisión y claridad.
- Asignar el título y numeración a cada una de las tablas, gráficas y diagramas que aparecen en el reporte.
- Verificar que el anteproyecto del reporte satisfaga los objetivos originales.
- Escribir el resumen y las conclusiones al final.
- Dar a leer el anteproyecto a otra persona para que emita su opinión y sugerencias y así poder corregirlo.

4.12.1 Estructura del reporte. En la estructura del reporte se observan ciertas convenciones establecidas por las revistas científicas y permiten cierta uniformidad en su presentación. También permite que el lector seleccione la sección que más le interese sin necesidad de revisar todo el reporte, sobre todo si se considera que muchas veces quien va a leerlo es un funcionario ocupado que solo le interesa saber en forma concisa y rápida cuáles fueron los resultados y conclusiones que se obtuvieron.

Un reporte formal usualmente está constituido por secciones, las cuales aparecen bajo los siguientes encabezados, aunque no necesariamente en el mismo orden.

- Título.
- Resumen.
- Tabla de contenido.
- Notación o nomenclatura.
- Introducción.
- Teoría.
- Procedimiento.
- Resultados.
- Discusión.
- Conclusiones.
- Agradecimientos.
- Apéndices.
- Referencias

Un reporte informal probablemente siga el mismo patrón pero se elabora con la idea de una narrativa continua, donde una sección puede agrupar varias secciones enlistadas y otras se pueden omitir.

Sin importar la forma del reporte escrito, las páginas deberán ser numeradas para una fácil referencia durante la discusión.

Es recomendable también que los márgenes y espacio entre las secciones sean amplios y los encabezados se escriban con mayúsculas.

4.12.2 Contenido Del Reporte

4.12.2.1. Título. El título sirve para identificar el reporte. Debe ser breve pero descriptivo. Ayuda a clasificar rápidamente el trabajo.

4.12.2.2. Resumen. Esta sección señala en forma breve el propósito y alcance del trabajo que se reporta, así como las principales conclusiones obtenidas. El resumen también permite a quienes trabajan en el tema decidir si quieren leerlo, y a los que solamente tienen interés general en el tema les proporciona los resultados esenciales sin necesidad de leer todo el reporte.

4.12.2.3. Tabla de contenido. Una lista de contenido es necesaria para los reportes largos; indica el número de páginas de cada una de las secciones. Esta tabla de contenido se incluirá cuando se considere que va a ser de ayuda para el lector y no por tratar de hacer más formal el reporte.

4.12.2.4. Notación o nomenclatura. Algunos autores consideran que es necesario dedicar una sección del reporte a proporcionar una lista que defina

brevemente cada uno de los símbolos que aparecen en el informe.

Es pertinente aclarar que existen otros autores que prefieren definir los símbolos no usuales en su primera aparición dentro del cuerpo del reporte.

4.12.2.5. Introducción. El propósito de la introducción es mostrar en forma gradual la relación del trabajo con el cuerpo de conocimientos ya existentes. Es aconsejable iniciarla con una breve revisión de los resultados obtenidos en trabajos anteriores acerca del mismo tema y con una indicación de las razones por las que se hizo el trabajo que se reporta. Al redactar la introducción el escritor deberá tener presente las características' del lector; esto le permitirá decidir cómo debe iniciarla. No siempre es necesario incluir una introducción en los reportes. Sin embargo, es importante que el estudiante adquiera cierta experiencia en la redacción de introducciones.

4.12.2.6. Teoría. En esta sección se debe presentar un bosquejo de la teoría que permita comprender al trabajo. En los casos en que un bosquejo de la teoría sea demasiado largo se incluirán solamente las conclusiones teóricas, dejando la teoría completa para un apéndice del reporte.

En esta sección también se acostumbra describir brevemente el método empleado, pero sin detalles.

4.12.2.7. Procedimiento. En esta sección se describe tanto el equipo como el procedimiento experimental empleado. La cantidad de detalles que se incluyen en esta sección no está determinada, pero los siguientes principios generales pueden servir de guía.

Si el equipo o el procedimiento que se utilizó son relativamente comunes, probablemente sea suficiente decir cual fue el que se empleó y dar una referencia de modo que el lector que se interese pueda encontrar una descripción completa. Además, si el equipo o el procedimiento contienen algunos aspectos nuevos se deberán describir con detalle.

La inclusión de fotografías y diagramas en esta sección permite al lector identificar el equipo y comprender el arreglo experimental. En los reportes por lo general no se incluye una lista del material utilizado ni el número de serie de cada instrumento de medición, ya que para la mayoría de los lectores estos detalles no son de interés.

Si existe un método muy especial que fue empleado en la medición de una magnitud en particular, se puede incluir en un apéndice a fin de evitar que se pierda la claridad en esta sección.

4.12.2.8. Resultados. Los resultados teóricos y experimentales se deberán incluir de manera clara. No es conveniente señalar todos los resultados obtenidos en un

experimento muy largo, porque generalmente distraen al lector, aunque algunas veces se incluyen en un apéndice por considerarse esenciales. Es decir, en esta sección se deben mostrar por medio de tablas y gráficas los resultados más importantes, así como las muestras representativas de algunas medidas básicas.

Es importante registrar en esta sección los valores de las incertidumbres asociadas a las magnitudes medidas, ya que permitirán al lector obtener sus propias conclusiones y examinar la confiabilidad de los resultados.

4.12.2.9. Discusión. Los comentarios del autor acerca de su propio trabajo aparecen en esta sección. Aquí es donde él puede:

- Justificar el tipo de arreglo experimental o el método de cálculo empleado.
- Establecer una comparación entre sus resultados y los de otros.

4.12.2.10. Conclusiones. En esta sección los principales resultados se resumen y su significado se explica con brevedad.

Cada conclusión que se presente debe estar referida tanto a los datos y resultados obtenidos como a la conveniencia de un diseño para determinado propósito. Una de las características de esta sección es que debe ser lo más breve posible para que se encuentren las conclusiones rápidamente.

4.12.2.11. Agradecimientos. Como una forma de reconocer la ayuda y las facilidades dadas por una empresa o un grupo de personas, en esta sección el autor expresa su agradecimiento por el apoyo dado. En la mayoría de los reportes de laboratorio de los estudiantes esta sección se omite.

4.12.2.12. Apéndices. Como se mencionó, las descripciones detalladas de equipo y de procedimientos experimentales, así como el desarrollo de teorías específicas, aparecen al final del reporte. Los apéndices tienen como finalidad dar más información a los lectores que tengan mayor interés por el trabajo realizado

4.12.2.13. Referencias. Es importante indicar los libros y artículos que se consultaron para que también el lector pueda recurrir a ellos. La manera de presentar esta sección es mediante una lista en orden alfabético de las referencias al final de los apéndices del reporte. La manera convencional de elaborar una referencia consiste en indicar: nombre del autor, título del artículo, título de la revista o libro, nombre de la editorial, número de volumen, número de página y año de publicación.

La longitud de cada sección puede variar desde cero hasta varias páginas, dependiendo del tipo de trabajo que se realizó y de la cantidad de trabajo que se reporte. Además, hay que recordar que en el reporte se debe incluir solamente la información que el lector requiere.

En los reportes de laboratorio de los estudiantes se pueden omitir algunas secciones que se han comentado en esta sección.

Finalmente, se puede decir que si se está interesado en escribir buenos informes uno debe ser su propio crítico, para preguntarse continuamente si lo que se ha escrito es lógico, conciso y claro.

4.13 RECOMENDACIONES GENERALES PARA LOGRAR UN REPORTE DE CALIDAD

- Concentrarse en la labor de escribir el reporte o escrito. Evitar la distracción y la divagación mientras se escribe, ya que esto, lleva a cometer errores.
- Poner a la mano todos los útiles y apoyos necesarios para escribir, es decir, se debe contar en el área donde se está escribiendo con lo siguiente; un diccionario de la lengua castellana, un diccionario de sinónimos y antónimos, hojas, lápices, plumas, gomas, de un diccionario de la lengua que se está traduciendo; de disquetes para respaldar la información si es que se está empleando una computadora, en fin, de todo lo necesario.
- Tener una idea muy clara de lo que se va a escribir, esto evitará verborrea, imprecisión y desorden en el reporte o documento.
- Seleccionar las palabras que expresen con exactitud lo que se quiere decir o lo que se observó. El empleo de términos equívocos y el enlace deficiente de palabras, frases u oraciones puede provocar confusiones en el lector.

- Evitar explicaciones sobre lo que ha dicho, pues si las ideas o descripciones han sido expresadas con claridad, sobran aclaraciones.
- Exponer las ideas en orden, a fin de hacer más clara la exposición y la lectura.
- Evitar frases inútiles. Ejemplo; "algunos de éstos átomos habían perdido un electrón, los demás no". En este enunciado resalta la última parte, la cual es innecesaria.
- No esperar que el escrito o reporte quede listo al primer intento. Debe revisarse una u otra vez hasta convencerse de que está plasmado lo que se quiere decir.
- Dar a revisar a otra persona o personas del área el informe o documento y aceptar las sugerencias que mejoren su estructura y claridad. No hay que molestarse por las críticas que se le hagan al documento o reporte.
- Realizar una revisión final antes de entregar el documento o reporte. No confié en quién pasó a limpio el manuscrito o versión inicial, *recuerde que el responsable del reporte o escrito es usted.*
- Cuidar la presentación del reporte o documento, ya que este debe tener un aspecto limpio, y ordenado. Deberá contemplarse el reporte como si fuera una colección de "cuadros".

5. IMPORTANCIA DE LOS COMPUTADORES EN LA TOMA DE DATOS.

5.1 USO DEL COMPUTADOR PARA LA INSTRUMENTACIÓN

Los procesos deben ser instrumentados, según se ha especificado, para disponer de información sobre el estado de su operación. Tal información es útil para asegurar que el proceso opera de acuerdo a las especificaciones de diseño, es decir, el estado de la planta es el deseado.

Se debe especificar aquí que se entiende por estado de un proceso. La noción difiere de la noción de estado termodinámico, si bien guarda alguna similitud. Al igual que el estado termodinámico, el estado de un proceso está reflejado por el valor cuantitativo de todas y cada una de las variables que permiten la completa caracterización de la operación; sin embargo, las variables del estado de una planta no requieren estar todas ligadas entre sí en forma explícita, mediante leyes de conservación (que es el caso de las variables termodinámicas de estado). La noción de estado del proceso es más bien simple, pero puede generar un extenso listado de variables. Mediante esta definición se podrá generar un listado de variables, ordenado, que contenga los valores de cada una de ellas, indexado por un número secuencial (una cuenta) y es así como se suele hablar del vector de estado, para referirse al valor de cada una de las variables de proceso que permiten la más completa definición del mismo.

Las variables son cuantificadas por sistemas sensores, es decir, por sensores seguidos de amplificadores (también llamados acondicionadores de señales) que generan una señal eléctrica (si bien existieron los que generaban señales de presión) y, posiblemente, producen una indicación local. Estos sistemas sensores suelen tener capacidad de transmisión de señales, es decir, generan una salida eléctrica cuyo valor es proporcional al valor de la variable medida.

Si se dispone de sistemas sensores con capacidad de transmisión, es posible llevar la información acerca de las variables en proceso, a un sistema computacional que permita mantener una versión actualizada permanente del estado de la planta.

5.2 CONVERSORES ANÁLOGO A DIGITAL

Los instrumentos suelen generar una salida eléctrica que es una función del valor de la propiedad que miden (es decir, tienen una ganancia definida y única, poco variante en el tiempo). Esta salida se dice de comportamiento análogo a la medición de la variable, pues refleja estrictamente, en todo momento, el valor medido de la propiedad. La salida se dice análoga porque es una simple función, usualmente lineal, de la posición de la aguja o del valor desplegado (en caso de medidores a dígitos) del sistema sensor; también se usa el término "análogo" para diferenciar esta medición de un número digital, válido en un computador digital.

Las salidas de los instrumentos conforman con ciertos estándares comunes, que pueden ser en potencial eléctrico (volts) o en corriente eléctrica (amper). Se encuentran instrumentos cuya salida varía entre 0 y 10 volts, 0 a 1 volts, 0 a 5 volts, 0 a 20 mA y 4 a 20 mA. El estándar favorito es la salida en corriente, en el rango 4 a 20 mA. En primer lugar, la transmisión de corrientes es preferible a la transmisión de voltajes porque el ruido hertziano (efecto antena) genera potenciales pero no puede (sin una transformación a propósito) generar corrientes; en segundo lugar, es muy útil que el cero instrumental no esté en el cero de señal transmitida porque de esta manera una corriente cero será, necesariamente, debida a un cable cortado y no una medición válida (si el cero de voltaje o de corriente corresponde a un valor aceptable de la propiedad medida, no será posible distinguir un cable cortado o un cortocircuito respecto de la condición cero de proceso).

La información de salida se puede llevar a cualquier instrumento subsecuente (habitualmente carta de registro en papel, acumuladores de datos, multi tester, etc.) mediante un simple par de cables, con tal que los rangos de ambos extremos correspondan entre si; de allí la importancia de especificar las normas de salida de los transmisores instrumentales.

Para poder disponer de información en un computador digital, es necesario traducir los valores de salida a números digitales que se puedan procesar. Los amplificadores se conectan a un sistema de circuitos eléctricos conocido como conversor análogo a digital, abreviado CA/D.

Un conversor análogo a digital acepta en su entrada un voltaje o una corriente eléctrica y genera un número digital que corresponde al valor de entrada, en el instante en que se realiza la conversión. Durante la conversión y/o entre una y otra medición, la señal de entrada podría variar sin que el conversor pueda tomar nota. Es decir, la conversión a números digitales significa que los valores de las propiedades se conocen en ciertos instantes y no en otros (en particular, se conocen según la frecuencia de muestreo). Desde el punto de vista de los procesos, las frecuencias de conversión actuales son tan altas (p.e. cada milésima de segundo) que no es posible el cambio significativo de propiedades en el intertanto.

Para lograr la consecución de un número digital que refleje estrictamente el valor de una entrada (p.e. de voltaje), basta con generar una rampa analógica (de voltaje en este caso) en el tiempo. Simultáneamente, se arranca un reloj digital (un número digital que aumenta en uno su valor cada cierta unidad de tiempo, p.e. cada millonésima de segundo) y se compara el voltaje de la rampa con el voltaje a "convertir". Cuando el comparador detecta la igualdad de ambos voltajes, detiene el contador del reloj y es ese número el que se utiliza para representar el valor del voltaje de entrada.

Por ejemplo, dado un reloj de 1 KHz (kilo Hertz significa mil veces por segundo) y un contador de 8 bits (es decir, de 256 cuentas), para un conversor de rango 0 a 10 volts, la rampa de voltaje generará 10 volts en 256 milésimas de segundo, es decir, 39.0625 volts por segundo o, su inverso, 0.0256 segundos por volt. Si se presenta una entrada de 5 volts, la comparación se alcanzará en 5×0.0256 segundos (=0.128 segundos). Naturalmente, un contador a tasa de 1000 cuentas por segundo, habrá generado el número 128 en versión digital (es decir, 1000000) y este número (digital) será utilizado en el computador para representar 5 volts.

Los CA/D necesitan, además, poder transmitir la información digital adquirida al sistema computacional del caso. A este fin, se utilizan protocolos de comunicación estandarizados, si bien existen aún protocolos ad hoc. Los protocolos más habituales en proceso químicos son de tipo serial, porque permiten mayores distancias de transmisión mientras que en procesos eléctricos se utilizan protocolos de transmisión paralela porque son más rápidos (pero de menor distancia de transmisión). Como ejemplo, se puede considerar que la interfase RS232C (puerto "mouse"), instalada como estándar en los computadores tipo PC, permite transmitir a unos 100 metros, mientras que la interface centronix (puerto de impresora) permite transmitir a unos 5 metros.

Aún la interfase RS232C sería limitante en una planta de procesos, porque sus señales de transmisión operan en base a voltajes absolutos (respecto de una referencia a tierra) y es así como se ha creado la interfase RS422A (y similares) que

operan en corrientes, de modo que su captura de ruido es menor y permite transmisiones de uno 700 metros.

Así entonces, las salidas de los instrumentos pueden ser conectadas a conversores análogo a digital, los conversores análogo a digital se alambran a su vez a un computador mediante interfaces de comunicaciones estandarizadas y, finalmente, se puede disponer de un programa computacional que administre, mediante el puerto de comunicaciones, la adquisición de datos de una planta de proceso.

5.3 SELECCIÓN DE CONVERSORES ANÁLOGO A DIGITAL

El uso de conversores para la adquisición de datos implica un número de definiciones de diseño.

Cabe destacar, en primer lugar, que no es imperativo utilizar un CA/D para cada sistema sensor, pues suele ser posible multiplexar (seleccionar mediante interruptores electrónicos programables) varias señales a un solo conversor A/D. En particular, el sistema utilizado en el laboratorio, de la marca OPTO22, multiplexa 16 señales analógicas en un solo "tablero" CA/D.

En segundo lugar, la precisión digital alcanzada por la conversión de una señal analógica depende del número de bits del CA/D que se usa. Por ejemplo, si un

sistema sensor transmite en la norma 4 a 20 mA y se convierte a digital mediante un conversor de 8 bits, se dispondrá de 256 números ($2^8=256$) para recorrer el espacio de 16 mA de la señal analógica (desde 4 a 20 mA), originando así una "precisión" de $16/256$ mA, es decir, se puede discriminar cada 5,14 pA. En términos de la propiedad medida, es posible utilizar una ganancia global, desde la propiedad medida (es decir, el valor que despliega el medidor local) hasta el número digital en el computador. Así por ejemplo, para la escala de pH de 0 a 14, una conversión de 8 bits permitiría discriminar cada $14/256$ (0,05) unidades de pH, que es perfectamente útil. Considerando, por otra lado, que hay variables que recorren un más amplio espacio de valores, como una termocupla de 0 a 1000 °C, la discriminación sería más bien pobre ($1000/256 \approx 0,25^\circ\text{C}$) y se debiera pensar en utilizar un conversor de 12 bits o definir subrangos de operación de la variable medida.

El diseñador debe también especificar la velocidad con que el valor de una variable puede ser obtenida en el computador (comando, conversión y transmisión); velocidad conocida como el throughput del sistema CA/D. Los sistemas CA/D comunes tienen capacidades de medición cada milésima de segundo (1KHz) y se pueden conseguir mejores velocidades con conversores de mayor costo. Los procesos suelen ser de cinéticas más bien lentas, si no están sujetos a cambios importantes de requerimiento de producción o de las perturbaciones. La frecuencia de toma de muestras será tan rápida como sea el más rápido cambio posible en el proceso y se debiera, entonces especificar la frecuencia del conversor según la cinética propia del proceso. Es

prudente, sin embargo, destacar que la velocidad de conversión, en un sistema multiplexado, será válida para cada variable medida, de modo que un throughput de 1KHz, utilizado para medir 10 variables, donde cada medición sea el promedio de 5 mediciones sucesivas permitirá obtener un nuevo conjunto de los 10 valores cada 50 milésimas de segundo. Además, utilizar el computador a esta tasa de adquisición de datos significaría que no cumple ninguna otra tarea.

En la práctica, mediciones cada 1 a 30 minutos son más que suficientes en procesos químicos de alta escala.

5.4 CONVERSIÓN DIGITAL A ANÁLOGO (CD/A)

En muchos casos puede ser importante que el computador que adquiere los datos fije, además, el valor de una acción sobre el proceso (por ejemplo, mover una válvula; acelerar o decelerar una bomba centrífuga; etc.)

En estos casos, en el programa del computador se concluye que una dada variable de operación tenga un determinado valor (p.e. frecuencia de un motor de bomba centrífuga) y este cálculo está alojado en una variable del programa,. Por ende es un número digital.

Para utilizar el valor calculado de la variable, se debe conseguir un número analógico en la forma, por ejemplo, de un voltaje o corriente estandarizado. Habitualmente, nos interesará conseguir una corriente en el rango 4 a 20 mA.

La conversión de un número digital a un variable eléctrica analógica se consigue mediante un conversor de digital a análogo CD/A, que habitualmente coexiste en el mismo sistema CA/D (i.e. se especifican conversores CA/D y CD/A en un mismo equipo o circuito).

6. REACTOR DE POLIMERIZACIÓN INDUSTRIAL.

6.1 REACTOR DE POLIMERIZACIÓN DE PETROQUIMA S.A

La empresa PETCO S.A. se dedica a producir cloruro de polivinilo o PVC, un material plástico que tiene muchas aplicaciones en la industria. Dentro de su proceso de manufactura este material tiene el aspecto de un fluido blanco, comúnmente llamado “lechada” que se desarrolla en reactores de gran tamaño y por tandas sucesivas. Esta etapa del proceso de fabricación del PVC se denomina polimerización, en la cual reaccionan las moléculas del monómero cloruro de vinilo (MVC) con diversos aditivos para así poder tener las propiedades requeridas para el producto final.

Un reactor es un equipo destinado para diversos procesos químicos, y uno de los reactores más importantes para determinar la economía de algún proceso es el diseño del mismo, debido a esto pueden existir una gran variedad de diseños que no siempre tiene relación con el tipo de operación, por lo que se puede emplear equipos de diferentes diseños para la misma reacción.

Los reactores se pueden clasificar en dos formas, una se relaciona con el tipo de operación y la otra según sus características de diseño; el reactor empleado en PETCO S.A. de acuerdo con el tipo de operación es un reactor discontinuo, al que se le introducen todos los reactivos al principio, los procesa según el curso de la reacción y durante ese proceso no se alimenta o se extrae ningún material. De acuerdo a sus

características de diseño; es un reactor tipo tanque, que es bastante común en la industria química, y está equipado con un método de agitación así como también con los elementos de transferencia de calor.

6.2 COMPARACIÓN DE LAS MEDIDAS DEL DISEÑO TEÓRICO DE ACUERDO A LAS GUÍAS DE DISEÑO DE CHEMINEER

Tabla 4. Comparación diseño teórico y diseño de PETCO.

GEOMETRÍA DEL REACTOR	DISEÑO TEÓRICO	DISEÑO DE PETCO
ESCALA DE AGITACIÓN	8 A 10	10
Distancia del impulso inferior	37.5 in	23.05 in
Distancia del impulsor superior	153.3in	143.5 in
Diámetro de la turbina	66.38-97.94 in	73.85 in
Diámetro del eje agitador	6.5-7.5 in	7 in
Anchos de baffles	12.5	10.75 in
Claro entre la pared del tanque y baffle	2.08	9.62 in

De acuerdo al cuadro anterior se puede observar que los resultados obtenidos por medio de la guía de diseño varían en ciertos modos de los datos del equipo instalado en PETCO debido a que se han hecho ajuste que se habrán hecho en ensayos de un equipo de menor escala.

En PETCO S.A. para poder realizar la comparación geométrica se debe resaltar el hecho que normalmente todo proceso de agitación requiere de experimentación en un sistema menor de escalas (Planta Piloto) para probar cambios que puedan mejorar el proceso y que dentro del diseño teórico es imposible de determinar. Aplicando los conceptos técnicos correctos en un planta piloto se pueden llegar a seleccionar satisfactoriamente del agitador. Además algunos de los problemas más difíciles para resolver en la agitación son los cambios geométricos. Muchas incertidumbres pueden descartarse realizando las pruebas en una pequeña escala en un sistema similar geoméricamente.

6.3 CONJUNTO DE POLIMERIZACIÓN

En el área de polimerización de la empresa PETCO S.A. opera con 10 reactores destinados a producir PVC, de los cuales ocho son de la compañía Chemineer. INC, y los restantes de la compañía "Philadelphia". Las condiciones de diseño de los reactores Chemineer, Inc son temperatura 32 °F y presión 271 lbf/in² vacío absoluto y las condiciones de operación son presión máxima 170 lbf/in² y temperatura máxima de operación 158°F. Entre los principales componentes que poseen los reactores de

polimerización utilizados por PETCO S.A. para la fabricación de PVC están los siguientes:

Motor Eléctrico. los reactores cuentan con un motor eléctrico, de gran poder, cuya carcasa es a prueba de explosión y esta diseñado para un severo servicio químico, con un aislamiento clase F, además pueden encontrar en voltajes estándares o especiales. Los fabricantes de estos motores recomiendan que durante la operación deba haber una buena circulación de aire por los motores con el propósito de asegurar un buen funcionamiento en el trabajo, alargando de esta manera la vida del motor.

Características Del Motor

- Motor Realince Electric
- Potencia: 20 Hp
- Factor De Servicio: 1.15
- Velocidad 1750 Rpm
- Tensión: 460 V
- Frecuencia 60 Hz
- N° Fase: 3

Reductor de velocidad. Este reductor de velocidad es compacto con ejes a 90°, construido de acero estructural. Esta constituido por una doble reducción donde la primera la forma un par de engranajes helicoidales y la segunda un par de engranajes cónicos espirales. Estos engranajes son endurecidos y fabricados a las tolerancias adecuadas para un contacto apropiado. Cumpliendo los estándares de calidad 10 de AGMA.

Entre las características más importantes están:

- MARCA: CHEMINEER MODELO 9-HB 200.
- TIPO: DOBLE REDUCCIÓN SERIAL 1-94025-1.
- VELOCIDAD DE ENTRADA 1750 RPM
- VELOCIDAD SALIDA: 97.5 RPM.

El agitador de PETCO S.A. ha sido diseñado por Chemineer, Inc, con el fin de obtener el óptimo desempeño requerido para el proceso. Debido a las características del proceso, se especifico un eje de impulsor de dos rodetes con aspas curvas, los cuales están ubicados en un extremo del eje. Estos ejes agitadores permiten un desalineamiento de 0.003 pulgadas por pie de longitud, pasada esta tolerancia, se debe enderezar el eje para reducir al mínimo la vibración y maximizar la vida del sello. El material del eje agitador es acero inoxidable, CARPENTER 452 28 Rockwell C. su longitud es de 5.20 metros con un diámetro de 7 pulgadas.

Composición metalúrgica del acero:

Carbono: 0.05%

Níquel: 5%/ 7%

Manganeso: 1.0%

Molibdeno: 0.5% / 1.0%

Silicón: 1.0%

Fósforo: 0.03%

Cromo: 14% / 16%

Sulfuro: 0.03

Cobre: 1.25% / 1.75%

7. VALIDACIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL

7.1 ESTUDIO EN MODELO REDUCIDO

En este capítulo se dará a conocer los trabajos realizados y las simplificaciones del prototipo hasta poder llegar a la modelación física de un reactor de polimerización de la empresa Petroquímica S.A, en el cual se encuentra Carboximetilcelulosa al 1%. Se pretendió modelar lo más fielmente posible a la realidad (prototipo). A continuación se presenta las decisiones más relevantes acerca de la escala, la velocidad, las fuerzas y demás factores que influyen a la hora de realizar un modelo físico a escala.

7.2 DETERMINACIÓN DE LA ESCALA DEL MODELO.

El Reactor de polimerización esta conformado por un agitador de paletas inclinadas.

Uno de los puntos más importantes a la hora de realizar un modelo reducido reside en la escala que se debe proponer para el estudio del mismo. A escalas grandes (1:20) el modelo resulta ser más parecido a la realidad pero también el costo es elevado y en cambio a escalas pequeñas (1:100) comienzan a generarse efectos de escala que introducen errores a la hora de analizar los resultados, pero lo más importante es que a estas escalas las magnitudes a medir pueden ser en exceso pequeñas y resultan

imposibles de medir. En este estudio se pretendió disminuir el costo de la estructura a diseñar sin permitir el deterioro de las medidas y ajustarse a un estado de flujo sea el más parecido al flujo del prototipo para admitir condiciones favorables de representación a escala.

Es recomendable en la creación de modelos utilizarse la escala de Froude. Es decir que se mantiene la relación de fuerzas preponderantes en el fenómeno: fuerzas de inercia respecto a las fuerzas de gravedad. Esta relación de fuerzas debe ser constante en modelo y prototipo, dando lugar a que los números de Froude, que son la representación de esta relación, sean iguales en modelo y prototipo: $F_{rp} = F_{rm}$, donde los subíndices indican prototipo y modelo, respectivamente. Dado que la escala de la geometría induce también una escala en la relación de las diferentes fuerzas que afectan el fluido, se escogió una escala que mantuviese el número de Reynolds (fuerzas de inercia respecto a fuerzas viscosas) lo más alto posible para asegurar un flujo turbulento y evitar en lo posible los efectos de escala.

En este sentido la escala que se escogió fue 24, de manera que 1 metro de modelo indica 24 metros en prototipo. Como el reactor de polimerización queda determinado por normas de diseño de reactores se tuvo en cuenta la semejanza geométrica la cual está íntimamente relacionada con la dimensión del modelo y el prototipo, según el análisis por eso la escala tomada 1/24 se mantuvo en todas las dimensiones del reactor, además se mantuvo los ángulos y las posiciones de las palas de los rodets,

las placas deflectores se mantienen a igual posición con el fin de conservar la dirección del flujo dentro del modelo.

El número de Reynolds del prototipo resulta ser, para velocidades Máximas de 9 m/s en el reactor de polimerización (en el diámetro del rodete), con viscosidad del CMC 1% a una temperatura de 25°C del orden 653 Centipoises debido a que en el prototipo el fluido de trabajo es CMC al 1%.

Esto traducido a escala 24 en modelo resulta de valor por encima del límite de los flujos de transición. En todo caso este valor de Reynolds es el mínimo que se maneja en todo el modelo. Creemos pues que reducir más la escala sería del todo perjudicial pues entraríamos a zonas de flujo de transición que no es recomendable.

Es importante indicar que el modelo debe ser a todas luces no distorsionado debido al carácter tridimensional del problema. Aunque después veremos que la aproximación numérica bidimensional se ajusta bastante bien a las expectativas del modelo físico. El estado de flujo que se genera en el reactor de polimerización es helicoidal, lo que representa un estado de las líneas de corriente moviéndose en tres dimensiones, como si fuesen corrientes generadas por la hélice de un barco. Evidentemente si se distorsiona el modelo, dándole una escala diferente en horizontal y otra en vertical, se traduce en una distorsión de los resultados o incluso en una transformación del propio carácter hidrodinámico del flujo.

La escala 24 entre el modelo y el prototipo se traduce en una relación entre las diferentes magnitudes a tratar, las fuerzas y otras magnitudes de interés. Así para esta escala geométrica $l_g = L_p/L_m = 24$, la escala en que se representa de velocidad resulta ser $l_v = 4.89$, la escala temporal es también $l_t = l_g^{1/2} = 4.89$, a relación de escala de fuerzas resulta ser de $l_F = l_g^3 = 13824$. La potencia del modelo, tendrá un valor mínimo de 1.83×10^{-6} hp, y un valor máximo de $3/4$ hp basado en las consideraciones de diseño, es decir teniendo en cuenta las fuerzas de fricción de las aspas con el fluido de trabajo

Como resultado de escoger la escala 24 entre el prototipo y el modelo, el reactor de polimerización tendrá las siguientes dimensiones reseñadas en la tabla 5.

Tabla 5. Dimensiones De Modelo De Reactor De Polimerización.

Reactor de Polimerización Petroquímica	Escala (1/24)	Modelo Reactor de Polimerización
Ø interior del reactor: 3810 mm	$3810 \times 1/24 = 15875$ mm	Ø interior del reactor = 158 mm
Altura del reactor = 5840.6 mm	$5840.6 \times 1/24 = 243.35$	Altura del reactor = 247 mm
Ø eje = 178 mm	$178 \times 1/24 = 7.41$ mm	Ø eje = 8 mm
Distancia del piso a la aspa inferior = 410 mm	$410 \times 1/24 = 17.08$ mm	Distancia del piso a la aspa inferior = 17 mm
Ø Rodete Aspa inferior = 1876 mm	$1876 \times 1/24 = 78.16$ mm	Ø Rodete Aspa inferior = 80 mm
Altura aspa inferior = 254 mm	$254 \times 1/24 = 10.58$ mm	Altura aspa inferior = 11 mm
Ø interior buje aspa inferior = 178 mm	$178 \times 1/24 = 7.41$ mm	Ø Interior buje de la aspa inferior = 8 mm
Ø Exterior buje aspa inferior = 305 mm	$305 \times 1/24 = 12.70$ mm	Ø Exterior buje de la aspa = 13 mm
Altura de buje(aspas inferior) = 330 mm	$330 \times 1/24 = 13.75$ mm	Altura de buje(aspas inferior) = 14 mm
Distancia entre aspa Inferior y aspa superior = 3060 mm	$3060 \times 1/24 = 127.50$ mm	Distancia entre aspa Inferior y aspa superior = 128 mm
Ø Rodete Aspa superior = 1830 mm	$1830 \times 1/24 = 76.25$ mm	Ø Rodete Aspa inferior = 78 mm
Altura aspa superior = 178 mm	$178 \times 1/24 = 7.41$ mm	Altura aspa inferior = 8 mm
Ø interior buje de la aspa superior = 178 mm	$178 \times 1/24 = 7.41$ mm	Ø Interior buje de la aspa superior = 8 mm
Ø Exterior buje de la aspa superior = 305 mm	$305 \times 1/24 = 12.70$ mm	Ø Exterior buje de la aspa superior = 13 mm
Altura de buje(aspas superior) = 330 mm	$30 \times 1/24 = 15.88$ mm	Altura de buje(aspas superior) = 16 mm
Angulo de Inclinación de las aspás = 20° Espesor de las aspás = 5 mm		
Espesor de las aspás superior e inferior = 110 mm	$110 \times 1/24 = 4.58$ mm	Espesor de las aspás superior e inferior = 5 mm

En el anexo A se observa el Plano del Reactor de Polimerización del presente trabajo.

7.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO REDUCIDO

El modelo de reactor de polimerización, está construido con lámina transparente de acrílico de 4 mm, el reactor está compuesto por un tubo que tiene un diámetro interior de 158 mm y una altura de 247 mm, el tubo está sellado por la parte inferior y tapado por la parte superior. El material se escogió transparente para facilitar visualizar mejor el comportamiento del polímero en el proceso de agitación, tomar las mediciones con mayor exactitud en los puntos deseados. En la parte inferior del reactor se encuentran cuatro baffles o láminas deflectoras con el fin de mantener la dirección del flujo y evitar los vértices que afectan al modelo experimental y ocasionan errores en las mediciones. El volumen de Carboximetil celulosa sodica al 1% utilizado en el reactor de polimerización es de $4.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

El mecanismo de agitación se construyó de acero 1022, en el cual se mantuvo la escala 1:24, además la misma forma e inclinaciones de las aspas. Cabe destacar que el rodete de la parte inferior del agitador es de mayor tamaño que el de la parte superior. El material tiene muy buenas propiedades anticorrosivas y no reacciona químicamente con el polímero.

7.4 DETERMINACIÓN DEL RANGO DE VELOCIDAD

En apartes anteriores se ha mencionado el ajuste del modelo del presente estudio al cumplimiento de los parámetros para obtener una semejanza cinemática, la cual exige que longitudes homólogas del modelo y prototipo tengan el mismo valor, y también que todas las relaciones entre tiempos homólogos tengan un valor común para que entonces haya una relación única de escala de velocidades. De ello hemos acordado un rango de velocidades entre 50 y 160 rpm, es decir, que en el modelo se medirán velocidades que fluctúen entre los 0.0334 m/s y los 0,107 m/s.

Con el anterior rango de velocidades establecido se pueden hallar los números de Reynolds máximos y mínimos sobre los cuales trabajara el modelo en estudio.

$$Re_{\min} = \frac{v D_a^2 \rho}{\mu} = \frac{50(0.08)^2 1050}{(60).(0.653)} = 8.57$$

$$Re_{\max} = \frac{v D_a^2 \rho}{\mu} = \frac{160(0.08)^2 1050}{(60).(0.653)} = 27.44$$

Donde ρ = Densidad (Kg/m³), μ = viscosidad (cp), v = Velocidad (m/seg), y D_a = diámetro de las aspa (m).

Calculamos el número de Reynold en el prototipo asumiendo que en el reactor de polimerización se encuentra CMC al 1%.

$$Re_{\text{prototipo}} = \frac{v D^3 \rho}{\mu} = \frac{975(1.875)^2 1050}{(60).0.653} = 91991$$

Los números de Reynolds sobre los cuales podrá trabajar el modelo se encuentran dentro del rango de régimen laminar, aquí las partículas fluidas se mueven a lo largo de trayectorias suaves en láminas o capas manteniéndose la dirección del flujo facilitándose así la determinación de las líneas de presión y de velocidad dentro del modelo.

El prototipo presenta un Número de Reynold que lo clasifica dentro de un estado de transición a turbulencia, el cual tiende a causar errores de mediciones en el modelo, pues presenta algunas partículas trayectorias irregulares y no se establece claramente el comportamiento del fluido.

7.5 DETERMINACIÓN DEL RANGO DE PRESIONES

En el modelo experimental del reactor de polimerización, se presentaran presiones con un valor aproximado de 0.37 psi. Cabe mencionar que el efecto de vorticidad es contrareestado con las s bafle o placas deflectora que están colocados dentro del reactor y además el reactor de polimerización estará completamente lleno de fluido de trabajo que girara a baja revoluciones, razón por la cual la presión medida con la ley de Pascal :

$$P=-\rho gZ+1/2\rho r^2\Omega^2$$

Donde ρ es la densidad del fluido; g es la aceleración de la gravedad; z es la altura de líquido; r es, el radio del rodete y Ω es la velocidad angular en s^{-1} .

El reactor de polimerización posee una altura de 0.248 m, la densidad de la solución de CMC al 1% es de 1050 Kg/m^3 , y la aceleración de la gravedad tiene un valor de 9.81 m/s^2 girando a 154 rpm.

$$P = 1050 \text{ Kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.248 \text{ m} + 0 = 2554.52 \text{ Pa} \approx 0.37 \text{ psi}$$

Despreciamos la presión que se genera si se produjera el efecto de vorticidad la cual esta dada en la formula por la expresión: $1/2\rho r^2\Omega^2$.

7.6 DETERMINACIÓN DE LOS RANGOS DE TEMPERATURA

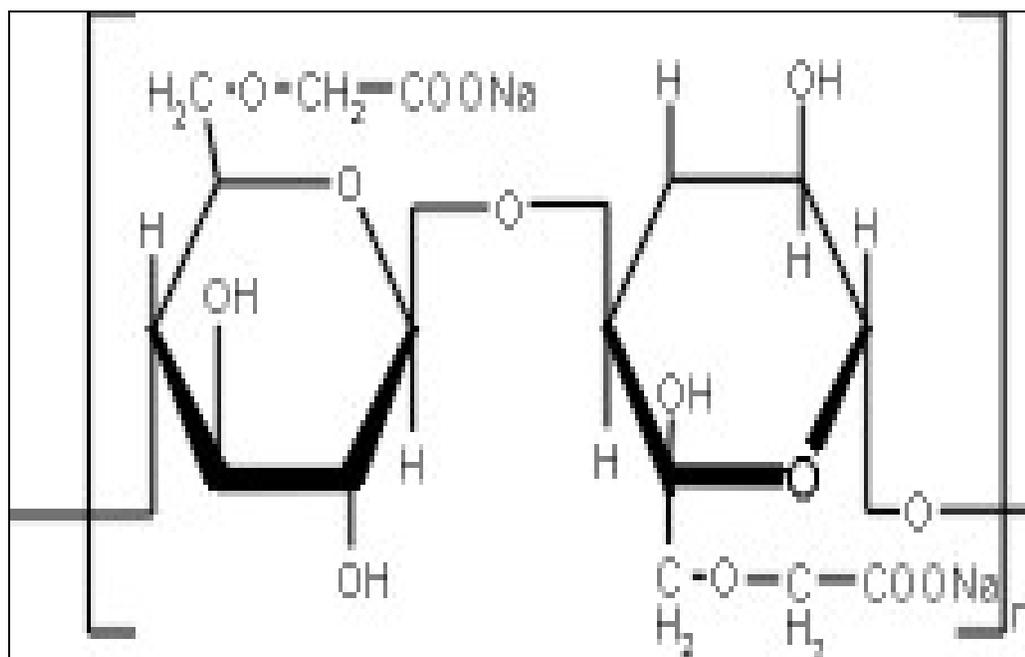
En el modelo del reactor de polimerización se considerara que no existe transferencia de calor, por lo tanto la temperatura del fluido estará en un rango aproximado a una temperatura ambiente de 32°C . Por esto en el diseño se va a considerar que el incremento de temperatura es mínimo para que haya una transferencia de calor significativa.

8. CARACTERÍSTICAS DEL FLUIDO DE TRABAJO

8.1 CARBOXIMETIL CELULOSA SODICA

Carboximetil Celulosa Sódica O CMC. Es una sal sódica de un éter policarboximetílico de celulosa. Contiene no menos de 6.98% y no más de 8.50% de sodio (Na), referido al preparado seco. Su estructura química se muestra en la Figura 28.

Figura 28. Estructura de Carboximetil celulosa (CMC)



Fuente: Tomado de Fessenden & Fessenden, Química Orgánica.

Descripción. Se encuentra en forma de polvo o gránulos blancos. El polvo es giroscópico; su suspensión acuosa al 1% tiene un pH de 6.5 a 8.0, son compatibles

con todos los demás derivados celulósicos y con las gomas naturales. Admiten además el agregado de alcohol hasta cierto límite.

Solubilidad. Se dispersa fácilmente en agua para formar soluciones coloides. Es compatible con los tensioactivos aniónicos y catiónicos.

Tabla 6. Especificaciones técnicas del Carboximetil celulosa sódica al 1%.

PROPIEDADES	VALORES
ASPECTO:	Polvo o Granulado
PUREZA:	Min. 99.5 %
HUMEDAD:	Máx. 10.0 %
GRADO DE SUSTITUCIÓN:	0.60 - 0.95
pH SOL. 1 %:	6.5 -8.0
VISCOSIDAD AL 1%:	4500 - 9000 mPas (653 Cp)
CONT. METALES PESADOS:	Máx. 10 ppm.
DENSIDAD:	1050 Kg/m ³

Fuente: Tomado de Morrison, Química Orgánica.

8.1.1 Usos de la Carboximetil Celulosa Sódica al 1%. Tiene aplicaciones como espesante, agente gelificante y estabilizante. Se usa al 1% en champús y lociones; al 0.5% en maquillaje líquido, y al 0.5-1% en pastas de dientes. En el caso de la Carboximetil celulosa entrecruzada, su función es la de fibra absorbente. La

Carboximetil celulosa sódica, es emulsivo y agente suspensor; como coloide hidrófilo sintético se usa para tratar el estreñimiento crónico, pues forma gel demulcente y blando que aumenta el volumen y pastosidad de las heces.

Contenido de sólido. La viscosidad de la Carboximetil celulosa es proporcional al contenido de sólidos, es decir, a mayor contenido de sólidos de la Carboximetil celulosa mayor será el valor de viscosidad obtenido. Por este motivo es conveniente indicar la concentración a la cual se lleva a cabo la medición de viscosidad. Esta es la misma razón por la que también se debe indicar si la evaluación se realiza en base seca o en base húmeda.

8.2 JUSTIFICACIÓN DE LA CARBOXIMETIL CELULOSA SODICA AL 1% COMO FLUIDO DE TRABAJO

El Carboximetil celulosa sódica será el fluido de trabajo para la el análisis del comportamiento hidrodinámico en un reactor de polimerización. La selección de este fluido de trabajo se basa en las siguientes características:

- El Carboximetil celulosa esta contenido dentro de la categoría de polímero tipo Carbohidratos y derivados.
- Sus principales características; insaboro, incoloro, inodoro, no tóxico y precio adecuado, lo colocan como un gran aditivo permitido por la Unión Europea. Por ser incoloro nos facilita ubicar los instrumentos de mediciones de diversas propiedades con mayor exactitud y permite observar las líneas de flujo en el modelo del reactor de

polimerización. Por no ser oxidante y tóxico no provoca daños a los equipos e instrumentos de medición y la salud humana.

- Se puede obtener varios grados de viscosidad dependiendo su concentración.

- El Carboximetil celulosa no es una sustancia volátil, es por esto que a diferencia de otros polímeros se puede realizar la experimentación sin que haya evaporación del mismo.

- La concentración por peso del fluido de trabajo será al 1%, debido a que comercialmente dicha concentración es la más utilizada, por ser compatible con derivados celulósicos, gomas naturales e inclusive alcohol.

8.3 EQUIPOS PARA LA PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE CARBOXIMETIL CELULOSA SODICA AL 1%

Para prepara cinco litros de CMC sodica al 1% debemos utilizar lo siguientes materiales y equipos:

- Carboximetil celulosa sodica 125 g

- Balanza de 0 a 2500 g.

- Pesa sustancia.

- Espátula.

- Balón.

- Agitador de vidrio.

- Agua destilada 5 litros.
- Recipientes de plástico con mediciones en litros.

8.3.1 Procedimiento preparación de la sustancia de trabajo.

- Se pesan 125 g de CMC y se agregan al balón.
- Se agrega 3 litros de agua destilada y se deja hidratar durante 48 horas.
- Se agita y se completa volumen de agua hasta hacer 5 Litros.

9. ESTUDIO REOLOGICO DEL FLUIDO DE TRABAJO

9.1 ANÁLISIS REOLOGICO DEL FLUIDO DE TRABAJO CARBOXIMETIL CELULOSA 1%

Desde hace más de 170 años los estudios de la mecánica clásica de fluidos y de los principios de elasticidad han permitido interpretar el comportamiento de los fluidos conocidos como newtonianos, por ejemplo, el agua, así como las pequeñas deformaciones de los cuerpos sólidos. Con posterioridad, se incorporó el estudio del flujo y la deformación de materiales no clásicos, como por ejemplo, la goma, los plásticos fundidos, las soluciones poliméricas, las pastas, los fluidos electrorreológicos, los composites, etc. Estos materiales exhiben una gran variedad de propiedades reológicas que no pueden ser explicadas por la mecánica clásica de los fluidos y la elasticidad.

Desde el punto de vista físico, hoy se expresa la viscosidad como “la medida de la resistencia que ofrece el fluido a su deformación. Esta resistencia es producida por las fuerzas de fricción internas entre las capas adyacentes del fluido en movimiento. Las fuerzas de fricción internas son, a su vez, el resultado de la acción de las fuerzas de

cohesión y del intercambio de la cantidad de movimiento entre las moléculas del fluido” (Garcell y colaboradores, 1988). Responde a la relación matemática conocida como ley de Newton de viscosidad, cuya expresión más simple para fluidos newtonianos en coordenadas rectangulares es:

$$\tau_{yx} = \mu (-d v_x / d y) = \mu \gamma \quad (1)$$

Donde:

τ_{yx} : esfuerzo cortante actuando sobre un plano perpendicular a y en la dirección x (Pascales).

$\gamma = (-d v_x / d y)$: gradiente de velocidad (s⁻¹).

μ : viscosidad (Pas).

La viscosidad describe el comportamiento físico de un fluido mientras es cizallado, o sea, cuando como consecuencia de un esfuerzo cortante adquiere una velocidad de flujo. La viscosidad puede depender de 5 parámetros:

Viscosidad $\mu = \mu(S, T, P, \gamma, t)$, donde:

S: identifica la constitución física química de la sustancia a medir; T: define la temperatura de la sustancia. La viscosidad depende de las variaciones de temperatura; P: define la presión de trabajo, y en general tiene influencia sólo a altas presiones; γ : define el gradiente de velocidad e influye grandemente en la viscosidad de muchos fluidos no newtonianos; t: el parámetro tiempo describe el fenómeno que representa el que la viscosidad de algunas sustancias depende de la duración del tratamiento previo al que se someta.

Cuando los fluidos no cumplen la ley de Newton de viscosidad se denominan fluidos no newtonianos, y se clasifican en tres grupos:

- Fluidos independientes del tiempo: Para los que la velocidad de deformación en un punto dado depende del esfuerzo cortante en dicho punto (Pseudoplásticos, dilatantes y con esfuerzo inicial).

- Fluidos dependientes del tiempo: Para los que la velocidad de deformación depende de la magnitud y de la duración del esfuerzo y posiblemente del tiempo entre aplicaciones consecutivas del esfuerzo cortante (tixotrópicos y reopéticos).

- Fluidos viscoelásticos: Son los que muestran una recuperación elástica parcial al suspenderse la aplicación del esfuerzo de deformación. Poseen propiedades de fluidos y de sólidos elásticos. (Ver anexo B).

Los fluidos no newtonianos independientes del tiempo, también llamado fluidos viscosos, se clasifican en:

- Fluidos con esfuerzo inicial: Para los que el movimiento no se produce para valores de esfuerzo cortante inferiores a un cierto valor límite, llamado esfuerzo de fluencia, y que se conocen como plásticos.

- Fluidos sin esfuerzo inicial: Son los que pueden ser considerados Pseudoplásticos y dilatantes. Los Pseudoplásticos se caracterizan por la disminución de viscosidad a medida que la velocidad de deformación aumenta, mientras que para los dilatantes un aumento de la velocidad de deformación provoca un aumento de la viscosidad.

Los fluidos dependientes del tiempo pueden ser *tixotrópicos* y *reopéticos*. Para los tixotrópicos se obtiene un decremento reversible del esfuerzo cortante con el tiempo a velocidad de deformación y temperatura fijas, mientras que para los reopéticos se obtiene un incremento reversible de esfuerzo cortante con el tiempo a velocidad de deformación y temperatura fijas. No obstante, se recogen evidencias de que la recuperación del fluido después de un tiempo de reposo puede no ser total como se indica anteriormente, sino que existe una recuperación parcial o incluso ésta puede no producirse.

En el anexo C, se observa que para estos fluidos existen valores diferentes de esfuerzo cortante para un mismo gradiente de velocidad. Por ejemplo, para un fluido tixotrópico, al iniciar el incremento de gradientes de velocidad, el movimiento resultará por la curva superior del anexo, mientras que al disminuir los gradientes de velocidad éste se realizará por la rama inferior. La superficie que se forma entre ambas ramas se conoce como superficie de histéresis y define la magnitud del comportamiento tixotrópico dependiendo del cizallamiento y de la duración de éste.

Los anexos B y C, relacionan el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación o gradiente de velocidad se conocen como curvas de flujo. Si lo que se representa es el valor de viscosidad para cada velocidad de deformación o gradiente de velocidad, la curva resultante se denomina curva de viscosidad.

Por analogía con los fluidos newtonianos se acostumbra a escribir:

$$\tau_{yx} = \eta (-\delta v_x / \delta y) = \eta \gamma \quad (2)$$

Donde η es la viscosidad aparente, la cual carece de significado si no se declara la velocidad de deformación aplicada.

Se han realizado estudios para vincular el concepto de viscosidad con la estructura de los fluidos, aunque el desarrollo teórico alcanzado para líquidos homogéneos dista del logrado en el estudio de los gases.

Los fluidos no newtonianos han sido objeto de estudios para interpretar el comportamiento que siguen en relación con su estructura. Para los fluidos Pseudoplásticos, que en general están formados por partículas de forma irregular con moléculas de largas cadenas ramificadas o entrecruzadas o que forman agregados moleculares, se ha brindado la siguiente explicación a su comportamiento. Las partículas componentes presentan en estado de reposo un movimiento desordenado siendo alta la resistencia a fluir; al aplicar una velocidad de deformación creciente, éstas se orientan en la dirección del flujo, pudiendo llegar a deslizarse mejor unas respecto a las otras, lo cual se traduce en la disminución de la viscosidad.

Al cesar la acción debido al movimiento browniano, recupera su estado original. De igual forma sucede cuando se estiran las estructuras o se destruyen los agregados. No obstante, se observa que para valores muy bajos y muy altos de velocidad de deformación existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación, y por lo tanto, un valor constante de viscosidad. En el primer caso, el movimiento browniano predomina manteniendo el orden casual, y en el segundo caso, ya se ha alcanzado la orientación de las partículas. Los valores de viscosidad asociados se conocen como viscosidad a gradiente cero y a gradiente infinito. En general, para velocidades de deformación mayores que $0,1 \text{ s}^{-1}$ se aprecia el efecto de disminución de viscosidad.

Para los *plásticos*, el examen de la estructura permite apreciar tres características:

- Un sistema bifásico con una fase líquida continua y una fase "sólida" dispersa, la cual no tiene que estar conformada por un auténtico sólido, sino sólo operar como tal (por ejemplo una gota de líquido o una burbuja de aire).
- El "sólido" tiene que estar finamente disperso en la fase líquida manteniéndose este conjunto estable por efectos de la cohesión interna.

- Ofrecer una relación correcta fase "sólida" / fase líquida, ya que si la fase "sólida es excesiva, el sistema se torna quebradizo, y si hay mucho líquido, no exhibe deformación plástica. Esta relación varía de un producto a otro, por ejemplo, el puré de papas contiene 90% de agua, y el chocolate fundido 35% de grasa líquida y ambos son plásticos.

Es común considerara los líquidos plásticos como sólidos y como líquidos. En su mayoría son dispersiones que en estado de reposo forman una red intermolecular de fuerzas de cohesión (Enlaces polares, Fuerzas de Van Der Waals) que evita el cambio de posición de los elementos de volumen e imprimen a la sustancia un carácter de cuerpo sólido con viscosidad infinita. Si las fuerzas externas son menores que las que forman la red, sólo se deforma elásticamente el cuerpo. Cuando las fuerzas externas sobrepasan las fuerzas de unión de la red, la estructura se desbarata y los elementos de volumen cambian de posición, es decir, fluyen.

De igual forma, en el caso de los fluidos *tixotrópicos* se explica el comportamiento asociado a cambios de estructura. Una dispersión en estado de reposo forma una estructura tridimensional debida a las fuerzas de unión que a menudo se denomina gel. Estas fuerzas se debilitan fácilmente cuando se somete la dispersión a la cizalladura durante un tiempo. Cuando se desmorona la estructura de gel, la viscosidad disminuye hasta que se alcanza un mínimo para un gradiente de velocidad constante. Este valor mínimo describe el estado de sol. La sustancia tixotrópica

recupera el estado de gel tras un tiempo de reposo típico para cada sustancia (tiempo de regeneración). En general, el 50% de la estructura de gel se regenera en minutos.

Debe observarse cómo la curva ascendente y la descendente no son iguales, quedando una superficie entre ambas ramas conocida como superficie de histéresis, que define la magnitud del comportamiento tixotrópico de un material.

Existen explicaciones estructurales para los restantes comportamientos, pero sólo se han comentado los más comunes.

En la literatura se reportan diversas ecuaciones para describir el comportamiento reológico de los fluidos no newtonianos independientes del tiempo. Las más comunes son:

$$\tau = K \gamma^n \quad \text{Ley de potencia o de Ostwald De Waele}$$

$$\tau = \tau_0 + K \gamma^n \quad \text{Ecuación de Herschel- Bulkley}$$

$$\tau^{n_1} = \tau_0^{n_1} + K_1 \gamma^{n_2} \quad \text{Ecuación de Herschel- Bulkley modificada.}$$

En estas expresiones K , K_1 , K_2 , K_3 , n , n_1 , n_2 y τ_0 son constantes características del sistema. Corresponderá al investigador la selección de una u otra ecuación en dependencia del ajuste logrado a los resultados experimentales.

Las ecuaciones más utilizadas para los fluidos independientes del tiempo son las de la Ley de Potencia y la de Herschel - Bulkley, encontrándose con la primera un buen ajuste para muchos fluidos Pseudoplásticos y dilatantes. Para éstos, el valor de K recibe el nombre de índice de consistencia y el valor de n el de índice de comportamiento de flujo (o índice de flujo), que indica la medida del grado de desviación del comportamiento Newtoniano. En el caso de los fluidos plásticos τ_0 es el esfuerzo de fluencia o tensión límite a partir de la cual comienza a fluir el material.

Para los fluidos dependientes del tiempo y los viscoelásticos se requieren ecuaciones de mayor complejidad que pueden ser consultadas en diversas obras.

Cuando se trabaja con suspensiones es posible encontrar sistemas con comportamiento newtoniano y otros con comportamiento no newtoniano, en dependencia de las características de cada uno de los sistemas.

Ha sido de interés encontrar ecuaciones para relacionar la viscosidad con el contenido de sólidos en suspensión. Para ello se ha definido la viscosidad relativa como:

$\eta_p = \eta / \eta_0$ Donde η : viscosidad de la suspensión a temperatura constante (Pas)

η_0 : viscosidad de la fase líquida a igual temperatura (Pas)

Entre las ecuaciones más comunes se encuentran:

$\eta_r = 1 + 2,5 \phi$ Ecuación de Einstein, válida para partículas esféricas, rígidas, bajas concentraciones, despreciando efectos inerciales, y siendo ϕ la fracción volumétrica de sólidos.

$\eta_r = 1 + 2,5 \phi + 2,5 \phi^2 + \dots$ Ecuación de Saito que considera los efectos inerciales.

$\eta_r = (1 - (\phi / A))^{-2}$ A toma valores desde 0,68 para esferas hasta 0,18 para fibras cortas de longitud/diámetro = 27.

$\eta_r = 1 + 2,5 \phi + 7,5 \phi^2$ Ecuación de Vand, válida para $\phi \leq 14 \%$.

$\eta_r = 1 + 2,5 \phi (1 + 5a / 32 d)$ Ecuación de Guth y Simha, válida para cuando se tiene en cuenta el efecto de las paredes sobre las partículas y la distancia "a" de las partículas a la pared es mucho mayor que el diámetro de la esfera "d".

$\eta_p = 1 + v\phi$ Válida para el trabajo con partículas no esféricas siendo v un factor de forma a evaluar.

- $\eta_r = 1 + 5,5 \phi \Phi$ Ecuación de Happel, válida para $\phi < 0,5$, donde Φ es un factor que da el autor para considerar las interacciones, y que depende de ϕ .
- $\ln \eta_r = 2,5 / (1 - c \phi)$ Ecuación de Mooney, donde c considera las interacciones.
- $\eta_r = 1 + 1,56 \phi / (0,52 - \phi)$ Ecuación de Mori y Ototake, válida para $\phi < 0,1$.

La viscosidad de las suspensiones a una temperatura dada depende de la naturaleza del fluido, de la naturaleza de las partículas suspendidas, de la concentración de éstas, así como del movimiento partícula - fluido. La ecuación más simple, la de Einstein, tiene grandes restricciones, de modo que su uso resulta limitado. Por otra parte, otros investigadores han encontrado ecuaciones similares pero con grandes variaciones en los coeficientes.

Por consiguiente, en la evaluación de un sistema dado parecería aconsejable no utilizar un modelo reportado en la literatura, sino partiendo del conocimiento de éstos, realizar la evaluación experimental para encontrar el modelo más adecuado que describa el sistema en estudio.

La dependencia de la viscosidad de los sistemas homogéneos y de las suspensiones con la temperatura puede ser expresada por una ecuación del tipo Arrhenius.

$\mu = A \exp. (B / RT)$, donde A y B son constantes características del fluido y T es la temperatura absoluta.

9.2 METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LAS RELACIONES DE VISCOSIDAD

El flujo de líquidos provocado por esfuerzos de cizalladura puede presentarse en cuatro formas básicas:

- Flujo entre placas planas paralelas: Se origina una corriente laminar en capas, en el líquido entre las placas y las capas se desplazan una respecto a otra a partir de una de ellas considerada fija e inmediata a la placa fija.
- Flujo en la ranura anular entre dos cilindros coaxiales: Uno de los cilindros se considera estacionario y el otro gira. El flujo de líquido puede interpretarse como el desplazamiento de capas laminares concéntricas.
- Flujo a través de capilares, toberas de ranuras anchas, y tubos: Si existe una diferencia de presión entre la entrada y la salida de un tubo lleno de líquido, éste comienza a fluir. El flujo tubular de un líquido ideal muestra un perfil parabólico de velocidades perpendicular a la sección del tubo. La configuración corresponde al desplazamiento de láminas de líquido en forma telescópica.
- Flujo entre placas circulares que rotan: Tal como sucedería al torsionar una pila de monedas.

Para la realización de las determinaciones experimentales de la viscosidad en líquidos, se han utilizado algunos de estos tipos de deformaciones y existen cinco métodos básicos:

- Medir el flujo de líquidos a través de tubos.

- Medir la velocidad de descenso de un cuerpo sólido a través del líquido.

- Medir la viscosimetría rotacional.

- Medir la viscosimetría vibracional.

- Técnicas empíricas.

Sólo se comentarán las dos más utilizadas actualmente.

- **Viscosímetros de tubos.** La viscosimetría de tubos puede ser capilar o de conducto diferenciándose en el diámetro del tubo: (1) Los capilares entre 0,1 y 4 mm, y (2) los de conducto entre 7 y 32 mm, en general. Los datos que se obtienen son: Caída de presión y flujo volumétrico. La aplicación de las ecuaciones diferenciales básicas para flujo laminar y estacionario, efectos finales despreciables, fluido incompresible cuyas propiedades no dependan de la presión ni del tiempo, a temperatura constante y no existiendo deslizamiento en la pared, conduce a la ecuación de Rabinowitsch - Mooney, que en dependencia del comportamiento del fluido tomará diferentes expresiones, entre las que se tienen:

$$Q = \pi \Delta P R^4 / 8 L \mu$$

Si es newtoniano.

$$Q = \pi (\Delta P / 2 L K)^{1/n} [n / (3n+1)] R^{(3n+1)/n}$$

Si cumple la ley de potencia.

Donde: Q: flujo volumétrico ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

ΔP : diferencia de presión entre los extremos del tubo (Pa)

R: radio del tubo (m)

L: longitud del tubo (m)

n: índice de flujo

K: índice de consistencia ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$)

El uso de viscosímetros de este tipo obliga a la realización de correcciones asociadas a:

- La variación de energía cinética causada por la aceleración del fluido desde la velocidad en el recipiente hasta la velocidad en el capilar (en general se expresa junto a la siguiente).

- Pérdidas de energía debidas a la convergencia del fluido a la entrada del capilar.

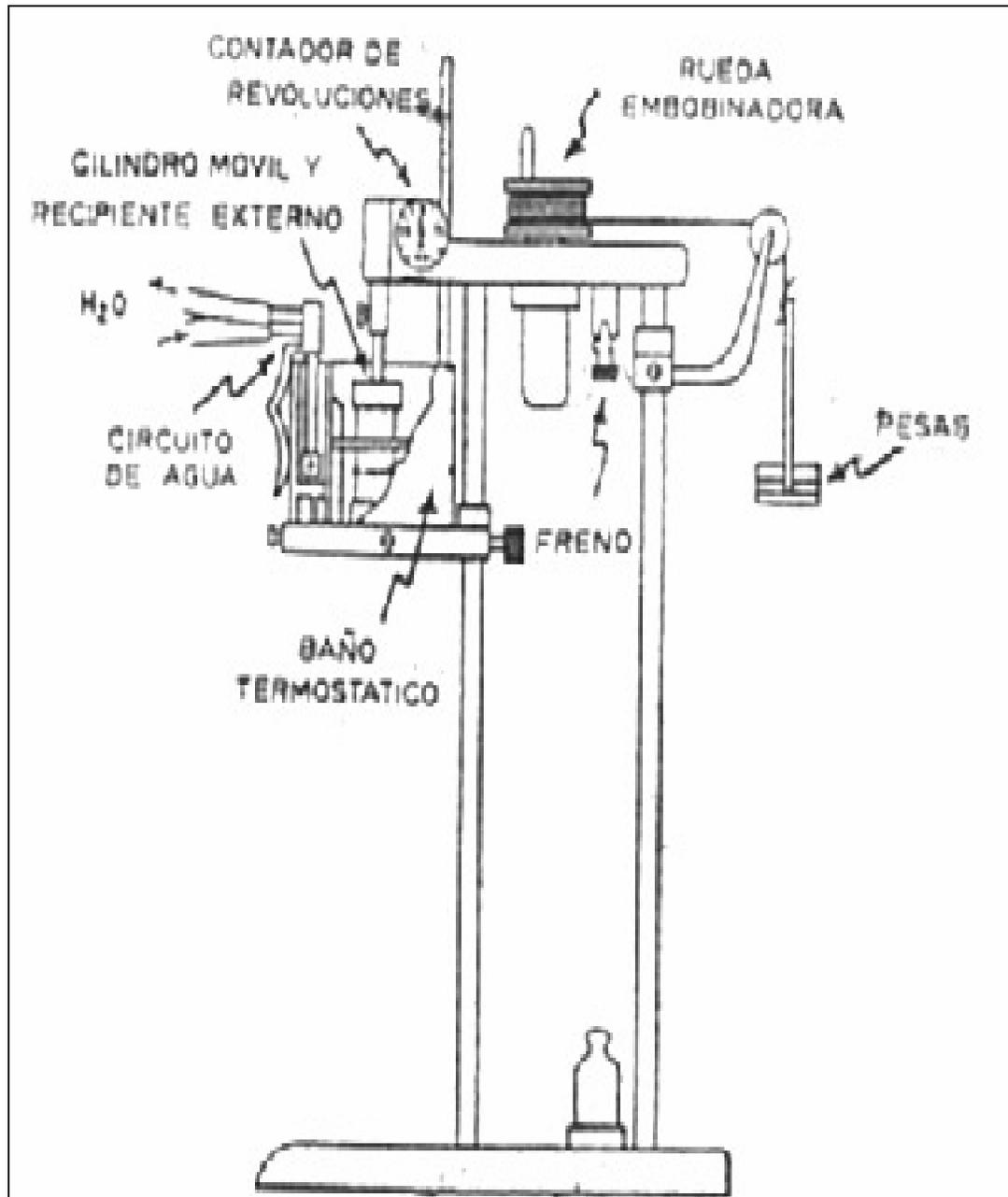
- Deslizamiento en la pared, con lo cual la capa de líquido que se adhiere a la pared tiene menor viscosidad que la del seno del fluido. Mientras mayor es el diámetro, menor es el efecto de deslizamiento. Sarmiento (1979) presenta cómo corregir el efecto de deslizamiento introduciendo un coeficiente de corrección en la ecuación de Rabinowitsch - Mooney, que depende del radio del tubo y del esfuerzo de corte y que se determina experimentalmente.

- Calentamiento viscoso, sólo necesario cuando se trabaja con fluidos muy viscosos y a altas velocidades de deformación.

Al utilizar estos viscosímetros deberá quedar establecida la relación L/R que contribuya a minimizar los efectos antes mencionados. Se recomiendan valores de $L/R > 60 - 80$ para poder considerar despreciables los efectos de entrada y salida.

- Viscosímetros rotacionales. Son los más versátiles de todos los viscosímetros, los cuales están basados en el principio del cilindro giratorio conocido como del tipo Couette, uno de los mas generalizados es el viscosímetro de Mac Michael. Un delicado aparato de este tipo ha sido diseñado por Green, y después modificado por Samin y Mattocks. Un segundo viscosímetro de este tipo rotatorio es el Searle, que consta de un cilindro interior colgante y giratorio y un recipiente exterior fijo, en el cual se coloca la muestra; su nombre comercial es el viscosímetro de Stormer. Una modificación de este modelo de aparato es el de Fischer, que se muestra en la figura 29.

Figura 29. Viscosímetro de Stormer. Las pesas en su caída hace girar el cilindro móvil dentro del recipiente estacionario, que contiene el líquido. La velocidad del cilindro se lee mediante el contador de revoluciones y cronometro.



Fuente: Cortesía Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Cartagena, Cartagena, Bolívar.

La viscosimetría rotacional puede ser de cilindro rotatorio externo (tipo Couette), de cilindro rotatorio interno (tipo Searle), de cono y placa, y de mezcla. La aplicación de las ecuaciones diferenciales básicas al sistema de cilindros concéntricos para flujo laminar y estacionario, los efectos terminales despreciables, el fluido incompresible, las propiedades del fluido independientes de la presión y el tiempo, la temperatura constante, la no existencia de deslizamiento en la pared y los componentes de velocidad radial y axial iguales a cero conducen a las siguientes ecuaciones:

$$\Omega = (M / 4 \pi \mu h) (R_i^{-2} - R_e^{-2}) \quad \text{Si el fluido es newtoniano.}$$

$$\Omega = (n/2 K^{-1/n}) (M / 2 \pi h R_i^2)^{1/n} [1 - (R_i/R_e)^{2/n}] \quad \text{Si cumple la ley de potencia.}$$

Donde Ω es la velocidad angular (Rad. s⁻¹)

M: Torque (Pa m³)

h: Altura del cilindro (m)

R_i: Radio del cilindro interior (m)

R_e: Radio del cilindro exterior (m)

A partir de estas expresiones y de la ecuación que caracteriza el comportamiento del fluido es posible encontrar la expresión de la velocidad de deformación (expresada como gradiente de velocidad) en función de la velocidad de rotación del cilindro que gira. Las expresiones más comunes que aparecen en la literatura definiendo α como la relación entre los radios externo e interno son:

$\gamma_i = \Omega / (\alpha - 1)$ Cuando se asume gradiente de velocidad uniforme, lo que es válido si $R_e - R_i \ll R_i$.

$\gamma_i = \Omega R_a / (R_e - R_i)$ Donde $R_a = (R_e + R_i) / 2$ y es válido para fluidos homogéneos y muy finas suspensiones, siempre que $R_e - R_i \ll R_i$.

$\gamma_i = 2 \Omega \alpha^2 / (\alpha^2 - 1)$ Válida para fluidos newtonianos.

$\gamma_i = (2\Omega / n) (\alpha^{2/n} / (\alpha^{2/n} - 1))$ Válida para fluidos que cumplan la ley de potencia y valores de α cercanos a 1 calculando $n = d(\ln M) / d(\ln \Omega)$.

$\gamma_i = 2 \Omega \alpha^2 / (\alpha^2 - 1) [1 + ((\alpha^2 - 1) / 2\alpha^2) (1 + 2/3 \ln \alpha) (1/n - 1) + (\alpha^2 - 1) / 6\alpha^2 \ln \alpha (1/n - 1)^2 + \dots]$

Conocida como ecuación de Krieger y Maron, válida para fluidos independientes del tiempo siempre que $\alpha < 1,2$ y calculando $n = d(\ln M) / d(\ln \Omega)$.

Como puede observarse, las restricciones que se imponen para la solución analítica de las ecuaciones diferenciales básicas y las expresiones de ellas derivadas, limitan el uso de las ecuaciones sencillas al caso de relaciones de radios entre los cilindros cercanas a 1, recomendándose valores $1,01 \leq \alpha \leq 1,4$.

La literatura recoge un conjunto de correcciones a realizar para solucionar las imprecisiones introducidas con las aproximaciones y consideraciones para el desarrollo de las ecuaciones. Las fundamentales son:

- Efectos finales, ya que el fondo del cilindro está en contacto con el fluido y no se tiene en cuenta en el desarrollo teórico de la ecuación. Los diseños actuales de rotores minimizan esta dificultad al no terminar en forma plana.

- Calentamiento viscoso que se reduce para espacios anulares pequeños.

- Efecto de pared al poder presentarse deslizamiento. Qiu y Rao (1989) presentan cómo realizar la corrección, pero señalan que cuando no hay tendencia a la separación de fases no se produce deslizamiento.

- Flujo secundario con la presencia de vórtices de Taylor, quedando establecidas las condiciones a las que puede despreciarse. Según este autor, deberá cumplirse la relación $\Omega R_i (R_e - R_i) \rho / \mu > 41,3 [R_e / (R_e - R_i)]^{1/2}$, donde ρ es la densidad (kg m^{-3}). Cuando el fluido es no newtoniano, se obtienen buenos resultados al sustituir la viscosidad aparente calculada para el mayor gradiente de velocidad.

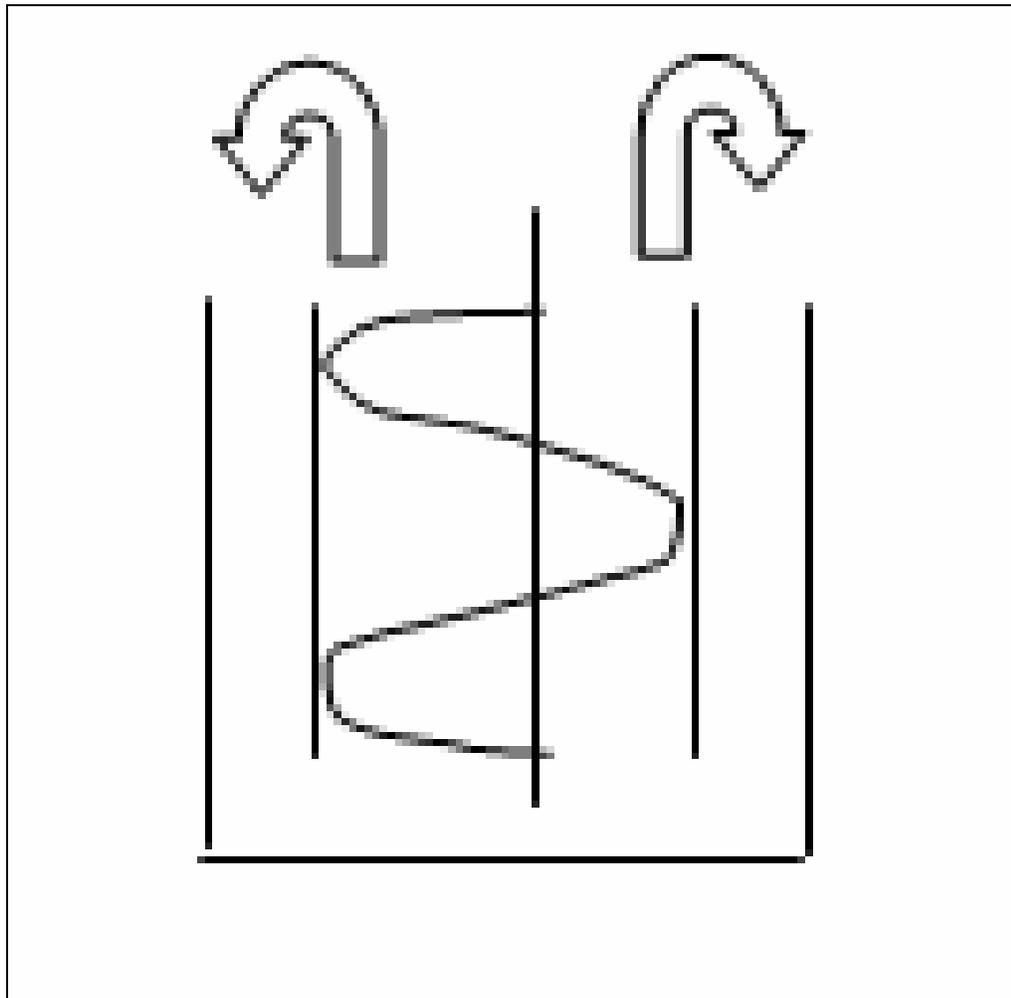
- Los viscosímetros de mezcla han sido utilizados cuando se presentan efectos de deslizamiento por tendencias a la sedimentación de partículas o cuando el tamaño de las partículas en la suspensión es tal que pueden resultar fracturadas durante los ensayos en otros viscosímetros. El efecto de agitación mecánica induce el flujo de material. Los tipos de impelentes utilizados dependen de las características de los fluidos. Si éstos son de baja viscosidad se utilizan impelentes de tipo turbinas, paletas y propelas, mientras que para altas viscosidades, se utilizan impelentes de tipo anclas, cintas helicoidales y tornillos helicoidales.

El uso de los viscosímetros de mezcla ha recibido un gran impulso al ser de uso común para el estudio de los sistemas de fermentación, dado que, por el carácter filamentosos de muchos de estos sistemas, los viscosímetros de tubo y rotacionales resultan inadecuados. En la literatura se encuentran trabajos utilizando como impelentes turbinas Rushton.

La selección del tipo de impelente a utilizar ha sido objeto de análisis para varios investigadores. En dependencia del patrón de flujo deseado y de los niveles de viscosidad, se recomienda para patrones de flujo radiales y viscosidades menores de 500 mPa.s, el uso de turbinas, mientras que para viscosidades superiores se recomienda el uso de rejillas y anclas; si el patrón de flujo es axial, se recomienda utilizar paletas y turbinas de hojas inclinadas, y propelas para viscosidades inferiores a 500 mPas, mientras que a mayores viscosidades se sugiere el uso de cintas helicoidales.

La utilidad de utilizar un viscosímetro de mezcla que usa como impelente un tornillo helicoidal con tubo de descarga, el cual se adapta al viscosímetro rotacional de cilindros concéntricos en calidad de elemento que rota. Demostraron la posibilidad de considerar en la modelación matemática del fenómeno un cilindro de un radio equivalente de modo tal que en la modelación sustituyera el efecto del sistema de impulsión complejo (helicoide con tubo de descarga). Comprobada la validez teórica del sistema, desarrollaron un procedimiento de calibración que permite encontrar las constantes que posibilitan la transformación de las lecturas en la escala de medición del viscosímetro en valores de esfuerzo de corte, así como la velocidad de rotación en valores de gradiente de velocidad. Este tipo de viscosímetro es el más indicado para la realización de determinaciones reológicas en suspensiones.

Figura 30 .Viscosímetro de mezcla. Impelente helicoidal con tubo de descarga



Fuente: Cortesía Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Cartagena, Cartagena, Bolívar.

- **En los viscosímetros de cono y placa**, la placa permanece estacionaria mientras que el cono rota. El mecanismo de medición determina la resistencia a la rotación que ofrece la muestra contenida entre el cono y la placa fija. La resistencia a la rotación del cono provoca un torque que es proporcional al esfuerzo cortante en el fluido. Cuando

el ángulo que forma el cono con la placa es muy pequeño (menos de 4°) se obtienen valores precisos en las determinaciones.

Las relaciones matemáticas que caracterizan este tipo de viscosímetro rotacional son:

$\tau = M / (2/3) \pi R^3$, donde M: torque (Pa m³); R: radio del cono (m).

$\gamma = \omega / \tan \theta \cong \pi * n / (30 * \theta)$, donde ω : velocidad del cono (s⁻¹); θ : ángulo del cono;
n: rpm.

9.3 CURVA REOLOGICA DEL CARBOXIMETIL CELULOSA SÓDICA AL 1%

Para conocer el comportamiento hidrodinámico del CARBOXIMETIL CELULOSA al 1% en un reactor de polimerización es necesario determinar la curva reológica del mismo. Se utilizó un viscosímetro rotatorio del tipo Stormer (ver anexo D); cuyos datos proporcionados fueron los siguientes:

Tabla 7. Datos de viscosidad del al Carboximetil celulosa al 1 % obtenido con un viscosímetro Stormer.

PESO(G)	TIEMPO (S)	VELOCIDAD ANGULAR Ω (Rad. s ⁻¹)
30.07	30.07	5.22
102.6983	26.57	5.91
112.6997	22.29	7.04
122.6995	19.72	7.96
142.6986	14.71	10.68
192.6978	7.905	19.87

Las dimensiones del viscosímetro Stormer son las siguientes:

Cilindro giratorio

- Diámetro interior: 0.031 m

- Altura: 0.034 m

Cilindro fijo

- Diámetro exterior: 0.048 m

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Calcular los esfuerzos utilizando el peso, multiplicándolo por la gravedad y luego dividiéndolo por el área de contacto del cilindro giratorio con el fluido de trabajo. Por ejemplo:

$Area = 2prh$, donde r es el radio del cilindro interior giratorio, y h la altura del cilindro interior, entonces:

$$A = 2 \times p \times 0.0155 \text{ m} \times 0.034 \text{ m} = 3.31 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

El esfuerzo está dado por:

$$t = \frac{mg}{A} = \frac{0.092 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2}{3.31 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 274.634 \text{ Pa}$$

Tabla 8. Variación de los esfuerzos cortantes aplicados al Carboximetil celulosa al 1 %, al variar la Velocidad Angular.

VELOCIDAD ANGULAR Ω (Rad. S ⁻¹)	ESFUERZO (N/m ²)
5.22	274.63
5.91	304.25
7.04	333.88
7.96	363.51
10.68	422.76
19.87	570.89

Basado en el flujo de Couette, se calcula el valor de la velocidad de deformación acatando las consideraciones siguientes:

- Gradiente de velocidad uniforme.
- Fluidos homogéneos y muy finos.
- Fluidos newtonianos.
- Fluidos que cumplan la ley de potencia y valores de α cercanos a 1.
- Fluidos independientes del tiempo siempre que $\alpha < 1,2$.

El viscosímetro del Stormer posee una relación entre los radios externo e interno $\alpha = 0.024 \text{ m} / 0.0155 \text{ m} = 1,5$.

- Basado en el gradiente de velocidad uniforme la velocidad de deformación está dada por $\gamma_i = \Omega / (\alpha - 1)$, y cumpliendo $R_e - R_i \ll R_i$. $= 0.024 \text{ m} - 0.0155 \text{ m} = 0.0085 \ll 0.0155$

Ejemplo: $\gamma = 5.22 \text{ s}^{-1} / (1.5 - 1) = 10.44 \text{ s}^{-1}$.

Tabla 9. Los valores de velocidad de deformación obtenida obedeciendo al criterio de gradiente de velocidad uniforme.

VELOCIDAD ANGULAR, Ω (Rad. s ⁻¹)	ESFUERZO (N/m ²)	VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN, $\gamma \cdot \text{s}^{-1}$
5.22	274.63	10,44
5.91	304.25	11,82
7.04	333.88	14,08
7.96	363.51	15,92
10.68	422.76	21,36
19.87	570.89	39,74

Ver anexo E. Grafica de esfuerzo contra velocidad de deformación criterio gradiente de velocidad uniforme.

- Basado en fluidos homogéneos y en muy finas partículas en suspensión, y cumpliendo que $R_e - R_i \ll R_i$. $= 0.024 \text{ m} - 0.0155 \text{ m} = 0.0085 \ll 0.0155$, la velocidad de deformación esta dada por: $\gamma_i = \Omega R_a / (R_e - R_i)$, donde $R_a = (R_e + R_i)/2 = (0.024 \text{ m} + 0.0155 \text{ m})/2 = 0.1975 \text{ m}$. Ejemplo:

$$\gamma_i = \frac{5.22 \text{ s}^{-1} \times 1.975 \text{ m}}{0.0085 \text{ m}} = 12.12 \text{ s}^{-1}$$

Tabla 10. Valores de velocidad de deformación obtenida obedeciendo al criterio fluido homogéneo y muy finas partículas en suspensión.

Velocidad angular, Ω (Rad. s ⁻¹)	Esfuerzo(N/m ²)	Velocidad de deformación, γ s ⁻¹
5.22	274.63	12.12
5.91	304.25	13.73
7.04	333.88	16.35
7.96	363.51	18.49
10.68	422.76	24.81
19.87	570.89	46.16

Ver anexo F. Grafica de esfuerzo contra velocidad de deformación criterio fluido homogéneo y muy finas partículas en suspensión.

- Basado en que el fluido tiene un comportamiento Newtoniano, la velocidad de deformación está dada por:

$$\dot{\gamma}_i = 2 \Omega \alpha^2 / (\alpha^2 - 1), \text{ donde } \alpha = 1.5 \text{ relación de radios.}$$

$$\text{Ejemplo: } \dot{\gamma}_i = \frac{2 \times 5.22 \text{ s}^{-1} \times 1.5^2}{(1.5^2 - 1)} = 18.79 \text{ s}^{-1}$$

Tabla 11. Valores de velocidad de deformación obtenidos obedeciendo al criterio que el fluido es Newtoniano.

Velocidad angular Ω (Rad. s ⁻¹)	Esfuerzo(N/m ²)	Velocidad de deformación $\dot{\gamma}$ s ⁻¹
5.22	274.63	12.12
5.91	304.25	13.73
7.04	333.88	16.35
7.96	363.51	18.49
10.68	422.76	24.81
19.87	570.89	46.16

Ver anexo G. Grafica Valores de velocidad de deformación obtenidos obedeciendo al criterio que el fluido es Newtoniano.

- Basado en que el fluido cumple la ley de potencia y valores de α cercanos a 1.

Y calculando $n = d(\ln M)/d(\ln \Omega)$, la ecuación esta dada por:

$$\gamma_i = (2\Omega / n) (\alpha^{2/n} / (\alpha^{2/n} - 1)).$$

Se calcula el momento teniendo en cuenta el volumen de cilindro giratorio, multiplicada por la fuerza, es decir, la masa multiplicada por la aceleración de la gravedad.

Ejemplo:

$M = m \times g \times R_i$, donde m : masa (pesa que se coloca al Storer; R_i : radio interior y g : gravedad).

$$M = 0.092kg \times 9.81m/s^2 \times 0.0155m = 0.14N\cdot m.$$

Tabla 12. Valores del torque y de la velocidad angular obedeciendo al criterio de la ley de potencia.

Velocidad angular Ω (Rad. s ⁻¹)	Torque M (N-m)
5.22	0.014
5.91	0.015
7.04	0.017
7.96	0.018
10.68	0.021
19.87	0.029

Teniendo los valores del momento, se busca el valor de n: índice de flujo aplicando la siguiente expresión:

$n = d(\ln M)/d(\ln \Omega)$, donde n es la pendiente de la curva de logaritmo neperiano de la velocidad angular contra el logaritmo neperiano de torque (ver anexo H). de Ln M contra Ln Ω . Esta expresión no tiene un significado físico, solamente un significado matemático.

Ejemplo:

$$\ln M = \ln 0.014 = -4.26$$

$$\ln \Omega = \ln 5.22 = 1.65$$

Tabla 13. Datos de LnM y LnΩ

N°	LnM	LnΩ
1	-4.26	1.65
2	-4.19	1.77
3	-4.07	1.95
4	-4.01	2.07
5	-3.86	2.36
6	-3.54	2.98

Ver anexo
H. Grafica

de Ln M contra Ln Ω

Se calcula la pendiente de la tabla anterior. Ejemplo:

$$n = \frac{-4.07 - (-4.26)}{1.95 - 1.65} = 0.63$$

$$n = \frac{-4.01 - (-4.19)}{2.07 - 1.77} = 0.60$$

$$n = \frac{-3.86 - (-4.07)}{2.36 - 1.95} = 0.51$$

$$n = \frac{-3.54 - (-4.01)}{2.98 - 2.07} = 0.51$$

$$n = \frac{0.63 + 0.60 + 0.51 + 0.51}{4} = 0.56$$

Los datos utilizado para hallar la pendiente son (1 y 3), (2 y 4),(3 y 5), (4 y 6), y se toman los valores de n, y se halla el Promedio para seleccionar el valor de n. Donde el promedio de n = 0.56.

Se calcula la velocidad de deformación. Ejemplo:

$$g_i = \frac{2 \times 5.22 s^{-1}}{0.56} \times \left(\frac{1.5^{\frac{2}{0.56}}}{1.5^{\frac{2}{0.56}-1}} \right) = 24.37 s^{-1}$$

Tabla 14. Valores de velocidad de deformación obtenidos obedeciendo al criterio que el fluido cumple la ley de potencia y valores de α cercanos a 1.

Velocidad angular Ω (Rad. s ⁻¹)	τ (N/m ²)	Velocidad de deformación γ s ⁻¹
5.22	274.63	24.37
5.91	304.25	27.59
7.04	333.88	32.86
7.96	363.51	37.16
10.68	422.76	49.86
19.87	570.89	92.76

Ver anexo I. Grafica de esfuerzo contra velocidad de deformación criterio ley de potencia.

Tabla 15. Valores de la velocidad de deformación aplicando las ecuaciones que rigen a flujo de Couette.

$\dot{\gamma}_i = \Omega / (\alpha - 1)$, Se asume gradiente de velocidad uniforme, valido si $R_e - R_i \ll R_i$	$\dot{\gamma}_i = \Omega R_a / (R_e - R_i)$, donde $R_a = (R_e + R_i) / 2$, para fluidos homogénea y muy finas suspensiones, siempre que $R_e - R_i \ll R_i$	$\dot{\gamma}_i = 2 \Omega \alpha^2 / (\alpha^2 - 1)$, válida para fluidos newtonianos.	$\dot{\gamma}_i = (2\Omega / n) (\alpha^{2/n} / (\alpha^{2/n} - 1))$, válida para fluidos que cumplan la ley de potencia y valores de α cercanos a 1, calculando $n = d(\ln M) / d(\ln \Omega)$
10,44	12,12	18,79	24.37
11,82	13,73	21,27	27.59
14,08	16,35	25,34	32.86
15,92	18,49	28,65	37.16
21,36	24,81	38,44	49.86
39,74	46,16	71,53	92.76

En la tabla 15 se descartan los valores de la velocidad de deformación basados en las condiciones de flujo de Couette que clasifican al fluido de trabajo como Newtoniano debido a que en la anexo 5 donde el Carboximetil celulosa sodica al 1% muestra la

tendencia logarítmica y no una tendencia lineal del esfuerzo cortante contra la velocidad de deformación.

También queda descartada la teoría aplicada a fluidos que cumplen la Ley de Potencia, y que necesariamente tienen una relación de radios cercana a 1. La solución de Carboximetil celulosa Sódica al 1% cumple con la ley de potencia, pero el valor de la velocidad de deformación no se puede calcular, ya que no cumple la relación entre radios, dicha relación queda limitada por el viscosímetro Storer utilizado tenía un valor de 1.5; es decir un valor lejano a 1.

Por otro lado la ecuación de Krieger y Maron, válida para fluidos independientes del tiempo siempre que $\alpha < 1,2$ y calculando $n = d (\ln M) / d (\ln \Omega)$, no se aplica debido a que la relación de radio del viscosímetro Storer utilizado para realizar las mediciones tiene un valor de $\alpha = 1.5$.

Se concluye que el fluido de trabajo cumple las dos condiciones restantes posibles en el flujo de Couette, es decir, que el gradiente de velocidad sea uniforme y que el fluido sea homogéneo con finas suspensiones.

Habiendo ya definido al CARBOXIMETIL CELULOSA al 1% como flujo de Couette homogéneo con finas suspensiones y gradiente de velocidad uniforme. El siguiente paso es aplicar regresión logarítmica para buscar los valores de n , luego con este

valor y obedeciendo la ley de potencia, se puede hallar el valor de K ; considerándolo tanto homogéneo como de velocidad uniforme.

$$\tau = K \left(\frac{dv}{dy} \right)^n$$

9.4 CALCULO DE LOS VALORES DE N Y K, CONSIDERANDO AL FLUIDO COMO HOMOGÉNEO

Se le aplica el logaritmo tanto al esfuerzo cortante como a la velocidad como se registran en la siguiente tabla 16.

Tabla 16. Valores de logaritmo de los esfuerzos cortantes y velocidad de deformación (flujo homogéneo)

N°	Log τ	Log du/dy
1	2.43	1.08
2	2.48	1.13
3	2.52	1.21
4	2.56	1.26
5	2.62	1.39
6	2.75	1.66

Ver anexo J. Grafica de $\text{Log}\tau$ contra $\text{Log } du/dy$ según el criterio de fluido homogéneo.

Se calcula la pendiente de $\text{Log}\tau$ contra $\text{Log } du/dy$, el valor de n será promediado entre todos los resultados como se muestra a continuación:

$$n = \frac{2.52 - 2.43}{1.21 - 1.08} = 0.69 \quad \text{tomando datos (1 y 3) de la tabla anterior}$$

$$n = \frac{2.56 - 2.48}{1.26 - 1.13} = 0.61 \quad \text{tomando datos (2 y 4)}$$

$$n = \frac{2.62 - 2.52}{1.39 - 1.21} = 0.50 \quad \text{tomando datos (3 y 5)}$$

$$n = \frac{2.75 - 2.56}{1.66 - 1.26} = 0.47 \quad \text{tomando datos (4 y 6)}$$

$$n_{\text{promedio}} = \frac{0.69 + 0.61 + 0.50 + 0.47}{4} = 0.56 = n_H$$

9.5 CALCULO DE LOS VALORES DE N Y K, CONSIDERANDO AL FLUIDO CON GRADIENTE DE VELOCIDAD UNIFORME

Se le aplica el logaritmo tanto al esfuerzo cortante como a la velocidad como se registran en la siguiente tabla 17.

Tabla 17. Valores de logaritmo de esfuerzo cortante contra logaritmo de velocidad de deformación (velocidad uniforme).

N°	Log τ	Log du/dy
1	2.43	1.01
2	2.48	1.07
3	2.52	1.14
4	2.56	1.20
5	2.62	1.32
6	2.75	1.59

Ver anexo K. Grafica log τ contra log du/dy según criterio velocidad uniforme.

Se calcula la pendiente de la anexo K, Log τ contra Log du/dy, el valor de n será promediado entre todos los resultados como se muestra a continuación:

$$n = \frac{2.52 - 2.43}{1.21 - 1.01} = 0.69 \quad \text{tomando los datos (1 y 3) de la tabla anterior}$$

$$n = \frac{2.56 - 2.48}{1.20 - 1.07} = 0.61 \quad \text{tomando los datos (2 y 4)}$$

$$n = \frac{2.62 - 2.52}{1.32 - 1.14} = 0.55 \quad \text{tomando los datos (3 y 5)}$$

$$n = \frac{2.75 - 2.56}{1.59 - 1.20} = 0.48 \quad \text{tomando los datos (4 y 6)}$$

$$n_{\text{promedio}} = \frac{0.69 + 0.61 + 0.55 + 0.48}{4} = 0.58 = n_{VU}$$

Se aplica la ley de potencia y se calcula el valor de k considerando al fluido como homogéneo. El valor de k será promediado entre los resultados como se muestra a continuación:

$$K = \frac{t}{(du/dy)^n}$$

$$K = \frac{274.63}{(12.12)^{0.56}} = 67.91$$

$$K = \frac{274.63}{(13.73)^{0.56}} = 70.16$$

$$K = \frac{274.63}{(16.35)^{0.56}} = 69.82$$

$$K = \frac{274.63}{(18.49)^{0.56}} = 70.96$$

$$K = \frac{274.63}{(24.81)^{0.56}} = 70.00$$

$$K = \frac{274.63}{(46.16)^{0.56}} = 66.76$$

$$K_{\text{Promedio}} = \frac{67.91 + 70.16 + 69.82 + 70.96 + 70.00 + 66.76}{6} = 69.26 \frac{\text{pa}}{\text{s}} = K_H$$

Se aplica la Ley De Potencia y se calcula el valor de K considerando al fluido como fluido con gradiente de velocidad uniforme. El valor de K será promediado entre los resultados como se muestra a continuación:

$$K = \frac{t}{(du/dy)^n}$$

$$K = \frac{274.63}{(10.44)^{0.58}} = 70.41$$

$$K = \frac{274.63}{(11.82)^{0.58}} = 72.62$$

$$K = \frac{274.63}{(14.08)^{0.58}} = 72.01$$

$$K = \frac{274.63}{(15.92)^{0.58}} = 70.96$$

$$K = \frac{274.63}{(21.36)^{0.58}} = 71.60$$

$$K = \frac{274.63}{(39.74)^{0.58}} = 67.76$$

$$K_{\text{Promedio}} = \frac{70.41 + 72.62 + 72.01 + 70.96 + 71.60 + 67.76}{6} = 70.89 \frac{\text{pa}}{\text{s}} = K_{VU}$$

Los valores de n y K será el promedio de los valores de los mismos obtenidos tanto como para fluido homogéneo como para velocidad uniforme como se muestra a continuación:

$$n = \frac{n_H + n_{VU}}{2} = \frac{0.56 + 0.58}{2} = 0.57$$

$$K = \frac{K_H + K_{VU}}{2} = \frac{69.26 + 70.89}{2} = 70.07$$

Se calcula la viscosidad aparente y se grafica para de esta forma definir cual es el comportamiento de la grafica viscosidad aparente contra velocidad de deformación. Hay que tener en cuenta que la viscosidad aparente se calculará considerando el fluido como homogéneo y que el fluido tiene velocidad uniforme.

Si la ecuación de la ley de potencia se escribe de la forma:

$$\tau_{yx} = k \cdot \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1} \cdot \left(\frac{du}{dy} \right) = h \cdot \left(\frac{du}{dy} \right)$$

Entonces $h = k \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1}$, se denomina viscosidad aparente. La mayor parte de los fluidos no newtonianos tienen viscosidades aparentes que son relativamente altas comparadas con la viscosidad del agua.

9.6 CALCULO DE LA VISCOSIDAD APARENTE CONSIDERANDO EL FLUIDO HOMOGÉNEO

Ejemplo:

$$h = k \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1}$$
$$h = 69.26 \times (12.12)^{0.56-1} = 23.10$$

Tabla 18. Viscosidad aparente y velocidad de deformación (Fluido homogéneo)

VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN (du/dy)	VISCOSIDAD APARENTE (h)
12.12	23.10
13.73	21.81
16.35	20.25
18.49	19.47
24.81	19.18
46.16	12.82

Ver anexo L. Comportamiento de la viscosidad aparente es inversamente proporcional al de la velocidad de deformación según criterio velocidad uniforme.

9.7 CALCULO DE LA VISCOSIDAD APARENTE CONSIDERANDO EL FLUIDO CON VELOCIDAD UNIFORME

Ejemplo:

$$h = k \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1}$$

$$h = 70.89 \times (10.44)^{0.58-1} = 26.46$$

Tabla 19. Viscosidad aparente y velocidad de deformación

Velocidad de deformación (du/dy)	Viscosidad Aparente(h)
10,44	26.46
11,82	25.12
14,08	23.34
15,92	22.17
21,36	19.59
39,74	15.09

Ver anexo M. Comportamiento de la viscosidad aparente es inversamente proporcional al de la velocidad de deformación según criterio de fluido homogéneo.

Los fluidos en los cuales la viscosidad aparente disminuye con el aumento de la relación de deformación ($n < 1$) se llaman Pseudoplásticos. Casi todos los fluidos no newtonianos entran en este grupo; los ejemplos incluyen soluciones poliméricas, suspensiones coloidales y pulpa de papel en agua. Si la viscosidad aparente aumenta con el incremento de la relación de deformación ($n > 1$), el fluido se denomina dilatante. En el caso del Carboximetil celulosa al 1% tiene valores de $n < 1$ y su viscosidad aparente disminuye con el aumento de la velocidad de deformación, tanto como fluido homogéneo como para fluidos con velocidad uniforme. Partiendo de lo anterior, se deduce que la Carboximetilcelulosa sódica al 1% presenta un comportamiento Pseudoplástico. Los valores de n y K para Carboximetil celulosa son los siguientes: $n = 0.57$ y $K = 70.07$.

Estos valores se calcularon haciendo un promedio entre los valores dados al considerar el fluido como homogéneo y con velocidad uniforme (Define del fluido de Couette).

10. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

10.1. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Los instrumentos para el análisis de las variables a medir, serán construidos teniendo en cuenta que comercialmente no se encuentran los adecuados que sirvan para medir las variables presentes en el modelo experimental del reactor de polimerización, por esto se hace necesario diseñar y calibrar dichos instrumentos, realizando una serie de pruebas anteriores al experimentos con el fin de definir la confiabilidad y sensibilidad; y establecer si el instrumento diseñado es el más indicado para realizar dichos mediciones.

Para el caso de la medición de la velocidad en varios punto del modelo experimental reactor de polimerización se utilizara un motor de corriente continua que posee aspas de agitación, para lograr establecer equivalencias entre la velocidad y el amperaje del motor al oponerle a su movimiento la corriente de fluido del agitador, luego utilizando las ecuaciones de presión de arrastre para calcular la variable en mención.

En el caso de la temperatura se construirá un Sensor para determinar dicha propiedad que consta de un tubo en bronce, que posee en su parte inferior un integrado que responde ante los cambios de temperatura emitiendo un voltaje, los cuales serán calibrados a manera de hacerlos corresponder con su respectivo valor de temperatura. No es necesario calcular la transferencia de calor entre el fluido de trabajo y el tubo de bronce, al considerarla despreciable ante las variaciones de velocidad existentes, mas

sin embargo justificaremos nuestro supuesto con base a los resultados de la experiencia.

Al requerir exactitud, una clara visualización de los datos tomados por los instrumentos de medición y monitoreo de los mismos, se hace necesario crear una interfase entre la adquisición de los datos (instrumentos de medición) y un computador para procesarlos.

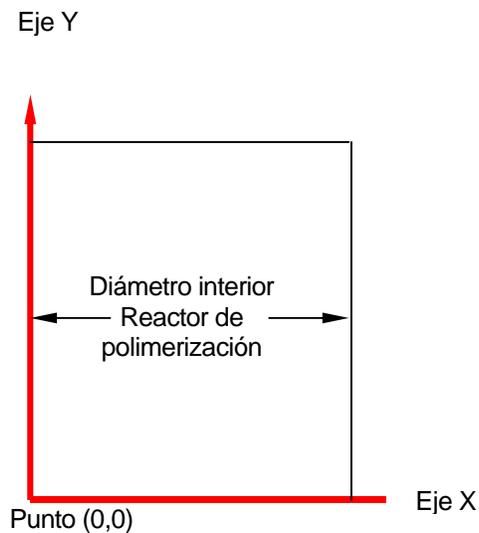
10.2. VARIABLES A MEDIR.

Las variables a medir serán tomadas por un instrumento de medición directa como es el caso de la temperatura y velocidad. Variables como la presión se obtendrán hallando otras propiedades físicas, transformándolas mediante formulas matemáticas de teorías de mecánicas de fluidos.

10.3. DEFINICIÓN DE LOS PUNTOS DONDE SE LLEVARA A CABO LA TOMA DATOS

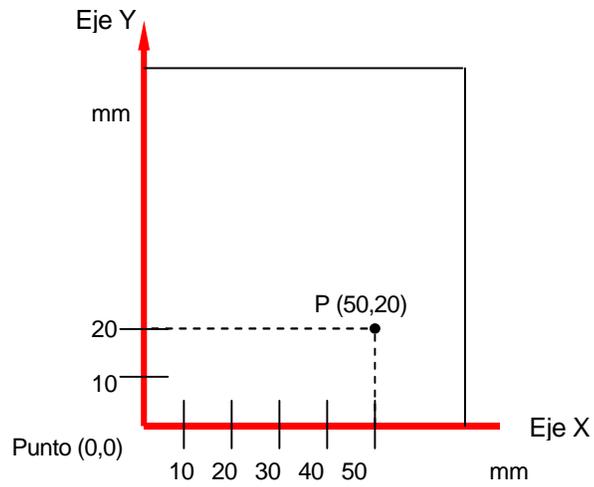
En el modelo experimental de un reactor de polimerización se tomaran datos en puntos definiendo un plano cartesiano de referencia, siendo el origen en la parte interna del reactor de polimerización en el lado inferior izquierda, lo cual quiere decir que los puntos hacia la derecha y hacia arriba son positivos las medidas. Haciendo un corte bidimensional del reactor quedara como se muestra en esta figura 31.

Figura 31. Corte bidimensional del reactor



Los valores de las coordenadas están dado en milímetros por ejemplo: la el punto de coordenada P (50, 20), quiere decir que en el eje X el punto esta situado a 50 mm del punto de referencia (0,0) y tiene un valor de 20 mm en el eje Y. Como se muestra a continuación en la figura 32.

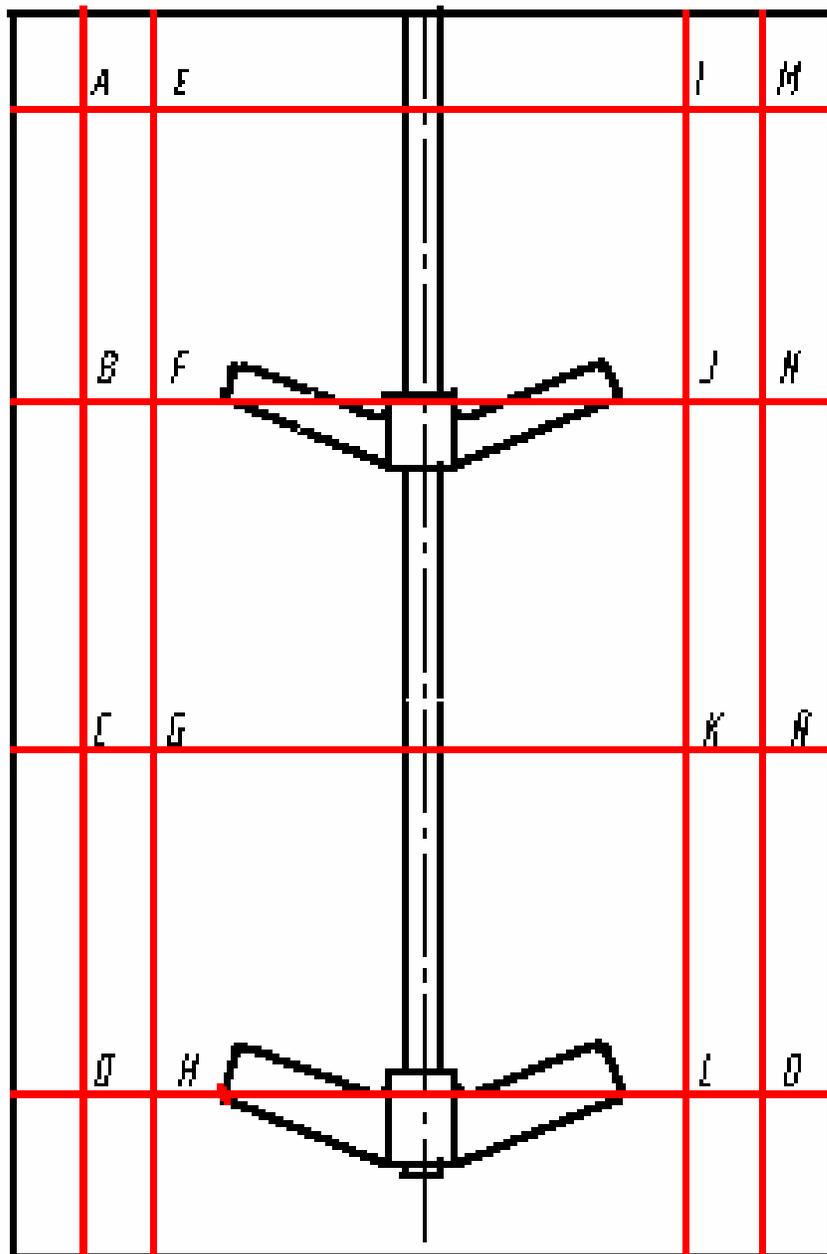
Figura 32. Plano coordenado del reactor.



Habiendo ya establecido el sistema de referencia para la ubicación de las coordenadas donde mediremos las variables de interés y se llevarán a cabo la toma de datos. Procederemos a establecer los puntos dentro de un plano para hacer más clara y organizada la información obtenida.

En la figura 33 se muestran los puntos de interés en los cuales se medirán las variables definidas anteriormente.

Figura 33. Corte transversal del modelo experimental del reactor de polimerización, destacando los puntos de interés donde se medirán las variables.



Las coordenadas de los puntos de interés donde se van a medir las variables definidas anteriormente están dadas en unidades en (mm) como se muestra en la tabla 20.

TABLA 20. Coordenadas cartesianas de los puntos de interés donde serán medidas las variables.

PUNTO	COORDENADA (X,Y)
A	(15,210)
B	(15,165)
C	(15,105)
D	(15,40)
E	(30,210)
F	(30,165)
G	(30,105)
H	(30,40)
I	(143,210)
J	(143,165)
K	(143,105)
L	(143,40)
M	(159,210)
N	(159,165)
Ñ	(159,105)
O	(159,40)

10.4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA TOMAR LOS DATOS DE TEMPERATURA EN LOS PUNTOS DE INTERÉS

El fin de esta experimentación es medir la temperatura en todo los puntos de interés definidos en el reactor de polimerización con el fin de comprobar si se producen incrementos de temperaturas altos, para definir si hay transferencia de calor en el reactor de polimerización.

10.4.1 Instrumentos y accesorios para medir temperatura. Para la realización de la experimentación se hace necesario los siguientes equipos y accesorios:

- Modelo experimental de reactor de polimerización (recipiente de acrílico, motor, estructura soporte del motor, tornillos de sujeción, sistemas de poleas y correas, aspas de agitación).
- Fluido de trabajo (Carboximetil celulosa sodica al 1 %). Cantidad 5.5 Litros.
- Termómetro. Escala -10-110°C; Error ± 0.001 .
- Computador
- Tarjeta de Adquisición de datos. - Programa de Instrumentación Virtual (lenguaje DELPHI).
- Sensor de temperatura (con interfase entre el sensor y el computador). Escala -20 a 38°C; Error: 0.0013.
- Manejo de datos (Análisis estadístico Matlab).
- Cronómetros, calibrador pie de rey y metro.
- Cámara video. Samsug 800X.

10.4.2. Pasos y definición de parámetros para medir temperatura.

- Preparación del fluido de trabajo, CMC 48 horas antes de la realización del experimento.
- Montaje del modelo experimental del Reactor de Polimerización
- Calibración de los instrumentos de medición.
- medir la temperatura ambiente.
- Toma de datos de los puntos de interés e ir procesándolos en el computador con las diferentes posiciones del motor del motor y velocidad del agitador (Posición 1: 154 RPM; posición 2: 152 RPM y posición 3: 153 RPM).
- La Adquisición de datos se hará de la siguiente manera: El motor del reactor se pone a funcionar y al pasar 10 segundos se introduce el termómetro en el punto de interés y se tomaran 20 muestras configurando el programa para que adquiera un dato cada 8 segundos, al terminar los 20 datos, el motor del reactor de polimerización de polimerización se apaga durante un tiempo de 160 segundos y nuevamente se toma los datos en otro punto de interés.
- Los datos serán organizados en tablas.
- Visualización de los datos utilizando Instrumentación Virtual.
- Utilización de aplicaciones estadísticas a los datos tomados.

10.5 TOMA DE DATOS DE TEMPERATURA EN EL REACTOR DE POLIMERIZACIÓN

Se debe tener en cuenta la temperatura ambiente cuando se van a tomar los datos en los puntos de interés, variar la velocidad del agitador y tomar un número de datos en cada punto de interés de 20 intervalos.

Experiencia 1. La temperatura ambiente tiene un valor de 30.1025°C

Tabla 21. Datos de temperatura del reactor de polimerización posición 1 del motor y velocidad del agitador 154 RPM. (Todos los datos están en °C)

Nº	A	B	C	D	E	F	G	H
1	30,0955	29,5900	29,9270	29,4215	29,4215	29,4215	29,5900	29,5900
2	30,0955	29,5900	29,7585	29,4215	29,4215	29,4215	29,5900	29,5900
3	30,0955	29,5900	29,5900	29,25300	29,5900	29,4215	29,5900	29,5900
4	30,0955	29,5900	29,5900	29,25300	29,5900	29,4215	29,5900	29,5900
5	30,0955	29,5900	29,4215	29,25300	29,5900	29,4215	29,5900	29,5900
6	30,0955	29,5900	29,4215	29,25300	29,5900	29,5900	29,4215	29,5900
7	30,0955	29,5900	29,4215	29,25300	29,5900	29,5900	29,4215	29,5900
8	29,9270	29,4215	29,4215	29,25300	29,5900	29,5900	29,4215	29,5900
9	29,9270	29,4215	29,4215	29,25300	29,7585	29,5900	29,4215	29,5900
10	29,9270	29,4215	29,25300	29,25300	29,7585	29,4215	29,4215	29,5900
11	29,9270	29,4215	29,4215	29,25300	29,7585	29,5900	29,4215	29,5900
12	29,9270	29,4215	29,25300	29,25300	29,7585	29,4215	29,4215	29,4215
13	29,9270	29,4215	29,25300	29,25300	29,7585	29,4215	29,4215	29,4215
14	29,9270	29,4215	29,25300	29,25300	29,7585	29,5900	29,4215	29,4215
15	29,9270	29,4215	29,4215	29,25300	29,7585	29,5900	29,4215	29,5900
16	29,9270	29,4215	29,25300	29,25300	29,7585	29,4215	29,4215	29,5900
17	29,9270	29,4215	29,25300	29,25300	29,7585	29,4215	29,4215	29,4215
18	29,9270	29,4215	29,25300	29,25300	29,7585	29,4215	29,4215	29,4215
19	29,9270	29,4215	29,25300	29,25300	29,7585	29,4215	29,4215	29,4215
20	29,9270	29,4215	29,25300	29,25300	29,7585	29,4215	29,4215	29,5900

Continúa en la siguiente hoja.

Nº	I	J	K	L	M	N	N	O
1	29,9270	29,9270	30,4325	29,7585	29,7585	29,7585	29,5900	29,9270
2	29,9270	29,7585	30,26400	29,5900	29,7585	29,7585	29,7585	29,9270
3	29,9270	29,7585	30,0955	29,7585	29,7585	29,9270	29,7585	29,9270
4	29,9270	29,7585	29,9270	29,7585	29,7585	29,9270	29,7585	29,9270
5	29,9270	29,7585	29,7585	29,7585	29,7585	29,9270	29,7585	29,9270
6	29,9270	29,7585	29,7585	29,7585	29,7585	29,9270	29,7585	29,9270
7	29,9270	29,7585	29,7585	29,5900	29,9270	29,9270	29,9270	29,9270
8	29,9270	29,7585	29,7585	29,5900	29,7585	29,9270	29,9270	29,9270
9	29,9270	29,7585	29,7585	29,5900	29,9270	29,9270	29,9270	29,9270
10	29,9270	29,7585	29,7585	29,7585	29,9270	29,9270	29,9270	29,7585
11	29,9270	29,7585	29,7585	29,7585	29,9270	29,9270	29,9270	29,9270
12	29,9270	29,5900	29,7585	29,5900	29,9270	29,9270	29,9270	29,9270
13	30,0955	29,7585	29,7585	29,5900	29,9270	29,9270	29,9270	29,9270
14	29,9270	29,7585	29,7585	29,7585	29,9270	29,9270	29,9270	29,7585
15	30,0955	29,7585	29,7585	29,5900	29,9270	29,9270	29,9270	29,9270
16	29,9270	29,7585	29,7585	29,7585	29,9270	29,9270	29,9270	29,9270
17	30,0955	29,7585	29,7585	29,7585	30,0955	29,9270	29,9270	29,9270
18	30,0955	29,7585	29,7585	29,7585	30,0955	29,9270	29,9270	29,9270
19	29,9270	29,7585	29,7585	29,7585	30,0955	29,9270	29,9270	29,9270
20	30,0955	29,7585	29,7585	29,7585	30,0955	29,9270	29,9270	29,9270

Experiencia 2. La temperatura ambiente tiene un valor de 30.1259°C

Tabla 22. Datos de temperatura del reactor de polimerización posición 2 del motor y velocidad del agitador 152 RPM. (Todos los datos están en °C)

N°	A	B	C	D	E	F	G	H
1	30,6010	30,2640	29,4215	29,9270	29,5900	29,2530	29,5900	30,0955
2	30,6010	30,0955	29,5900	30,0955	29,7585	29,4215	29,5900	30,0955
3	30,6010	30,0955	29,5900	29,9270	29,7585	29,5900	29,7585	30,0955
4	30,4325	30,0955	29,7585	30,0955	29,7585	29,5900	29,7585	30,0955
5	30,4325	30,0955	29,7585	30,0955	29,7585	29,7585	29,7585	30,0955
6	30,4325	30,0955	29,9270	29,9270	29,7585	29,7585	29,9270	30,0955
7	30,4325	30,0955	29,9270	30,0955	29,7585	29,7585	29,9270	30,0955
8	30,4325	30,0955	29,9270	29,9270	29,7585	29,7585	29,9270	30,0955
9	30,4325	30,0955	29,9270	30,0955	29,7585	29,9270	29,9270	30,0955
10	30,4325	30,0955	29,9270	30,0955	29,7585	29,9270	29,9270	30,0955
11	30,4325	30,0955	29,9270	29,9270	29,7585	29,9270	29,9270	30,0955
12	30,4325	30,0955	29,9270	30,0955	29,7585	29,9270	29,9270	30,0955
13	30,4325	30,0955	29,9270	30,0955	29,5900	29,9270	30,0955	30,0955
14	30,4325	30,0955	29,9270	30,0955	29,5900	29,9270	29,9270	30,0955
15	30,4325	30,0955	30,0955	30,0955	29,5900	29,9270	29,9270	30,0955
16	30,4325	30,0955	30,0955	30,0955	29,5900	29,9270	29,9270	30,0955
17	30,4325	30,0955	29,9270	30,0955	29,7585	29,9270	29,9270	30,0955
18	30,2640	30,0955	30,0955	30,0955	29,7585	29,9270	30,0955	30,0955
19	30,2640	30,0955	30,0955	30,0955	29,5900	29,9270	29,9270	30,0955
20	30,2640	30,0955	29,9270	30,0955	29,5900	29,9270	29,9270	30,0955

Continúa en la siguiente página.

N°	I	J	K	L	M	N	N	O
1	29,2530	30,2640	29,5900	30,0955	28,7475	30,0955	30,2640	30,2640
2	29,4215	30,0955	29,7585	30,0955	29,0845	30,2640	30,2640	30,2640
3	29,5900	30,0955	29,9270	30,0955	29,2530	30,2640	30,2640	30,2640
4	29,7585	30,0955	29,9270	30,0955	29,4215	30,2640	30,2640	30,2640
5	29,9270	30,0955	29,9270	30,0955	29,5900	30,2640	30,2640	30,2640
6	29,9270	30,0955	30,0955	30,0955	29,5900	30,2640	30,2640	30,2640
7	29,9270	30,0955	29,9270	30,0955	29,7585	30,2640	30,2640	30,2640
8	30,0955	30,0955	30,0955	30,0955	29,7585	30,2640	30,2640	30,2640
9	30,0955	30,0955	30,0955	30,0955	29,7585	30,2640	30,2640	30,2640
10	30,0955	30,0955	30,0955	30,0955	29,9270	30,2640	30,2640	30,2640
11	30,0955	30,0955	30,0955	30,0955	29,9270	30,2640	30,0955	30,2640
12	30,0955	30,0955	30,0955	30,0955	29,9270	30,2640	30,2640	30,2640
13	30,0955	30,0955	30,0955	30,0955	30,0955	30,2640	30,0955	30,2640
14	30,0955	30,0955	30,0955	30,0955	30,0955	30,2640	30,0955	30,2640
15	30,0955	30,0955	30,0955	30,0955	30,0955	30,0955	30,2640	30,2640
16	30,2640	30,0955	30,0955	30,0955	30,0955	30,2640	30,0955	30,2640
17	30,2640	30,0955	30,0955	30,0955	30,2640	30,0955	30,2640	30,2640
18	30,2640	30,0955	30,0955	30,0955	30,2640	30,2640	30,0955	30,2640
19	30,2640	30,0955	30,0955	30,0955	30,0955	30,2640	30,2640	30,2640
20	30,2640	30,0955	30,0955	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640

Experiencia 3. La temperatura ambiente tiene un valor de 31.0995°C

Tabla 23. Datos de temperatura del reactor de polimerización posición 3 del motor y velocidad del agitador 153 RPM. (Todos los datos están en °C).

N°	A	B	C	D	E	F	G	H
1	28,4105	30,0955	30,0955	30,2640	29,0845	30,2640	30,2640	30,2640
2	28,7475	30,0955	30,0955	30,2640	29,2530	30,2640	30,2640	30,2640
3	29,0845	30,0955	30,2640	30,2640	29,5900	30,2640	30,2640	30,2640
4	29,2530	30,0955	30,2640	30,2640	29,5900	30,2640	30,2640	30,2640
5	29,4215	30,0955	30,2640	30,2640	29,7585	30,2640	30,2640	30,0955
6	29,5900	30,0955	30,2640	30,2640	29,9270	30,0955	30,0955	30,0955
7	29,5900	30,0955	30,2640	30,2640	29,9270	30,2640	30,2640	30,2640
8	29,7585	30,0955	30,2640	30,2640	29,9270	30,2640	30,2640	30,2640
9	29,7585	30,0955	30,2640	30,2640	30,0955	30,0955	30,2640	30,2640
10	29,9270	30,0955	30,2640	30,2640	30,0955	30,2640	30,2640	30,2640
11	29,9270	30,0955	30,2640	30,2640	30,0955	30,2640	30,2640	30,2640
12	29,9270	30,0955	30,2640	30,2640	30,0955	30,0955	30,0955	30,0955
13	29,9270	30,0955	30,2640	30,2640	30,0955	30,2640	30,2640	30,2640
14	29,9270	30,0955	30,2640	30,2640	30,0955	30,2640	30,2640	30,2640
15	29,9270	30,0955	30,0955	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640
16	29,9270	30,0955	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640
17	30,0955	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640
18	30,0955	30,0955	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	30,0955	30,0955
19	30,0955	30,0955	30,2640	30,2640	30,2640	30,0955	30,2640	30,2640
20	30,0955	30,0955	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640

Continúa en la siguiente pagina.

Nº	I	J	K	L	M	N	N	O
1	29,2530	29.8585	30,0955	29,9270	28,4105	29,7585	29,4215	29,9270
2	29,5900	30,2640	30,0955	30,0955	28,9160	29,9270	29,5900	30,0955
3	29,7585	30,2640	30,0955	30,0955	29,2530	30,0955	29,9270	30,0955
4	29,9270	30,2640	30,2640	30,0955	29,7585	30,0955	29,9270	30,2640
5	29,9270	30,2640	30,2640	30,2640	29,7585	30,2640	30,0955	30,2640
6	29,9270	30,2640	30,2640	30,2640	29,7585	30,2640	30,0955	30,2640
7	30,0955	30,2640	30,2640	30,2640	29,9270	30,2640	30,0955	30,2640
8	30,0955	30,2640	30,2640	30,2640	29,9270	30,2640	30,2640	30,4325
9	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	29,9270	30,2640	30,0955	30,4325
10	30,0955	30,2640	30,2640	30,2640	30,0955	30,2640	30,2640	30,4325
11	30,0955	30,2640	30,2640	30,2640	30,0955	30,2640	30,0955	30,4325
12	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	30,0955	30,2640	30,2640	30,4325
13	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	30,0955	30,2640	30,0955	30,4325
14	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	30,0955	30,2640	30,4325	30,4325
15	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	30,0955	30,2640	30,4325	30,4325
16	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	30,0955	30,2640	30,2640	30,4325
17	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	30,0955	30,2640	30,4325	30,4325
18	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	30,0955	30,2640	30,4325	30,4325
19	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	30,0955	30,2640	30,4325	30,4325
20	30,2640	30,2640	30,2640	30,2640	30,0955	30,2640	30,4325	30,4325

10.6 DATOS ESTADÍSTICOS DE LOS DATOS DE TEMPERATURA

Para el análisis estadístico se hará el uso del programa Matlab 5.3.

Tabla. 24. Datos estadísticos de los de temperaturas en los de interés cuando el motor esta en la posición 1 y la velocidad de agitador es de 154 RPM.

Puntos de interés	Valor promedio °C	Desviación estándar	Valor de la mediana
A	29.9860	0.0825	29.9270
B	29.4805	0.0825	29.4215
C	29.4046	0.1886	29.4215
D	29.2698	0.0519	29.2530
E	29.6743	0.1160	29.7585
F	29.4805	0.0825	29.4215
G	29.4636	0.0749	29.4215
H	29.5394	0.0792	29.5900
I	29.9691	0.0749	29.9270
J	29.7585	0.0547	29.7585
K	29.8428	0.1933	29.7585
L	29.6995	0.0825	29.7585
M	29.9017	0.1256	29.9270
N	29.9102	0.0519	29.9270
Ñ	29.8680	0.0989	29.9270
O	29.9102	0.0519	29.9270

Tabla. 25. Datos estadísticos de los de temperaturas en los puntos de interés cuando el motor esta en la posición 2 y la velocidad de agitador es de 152 RPM.

Puntos de interés	Valor promedio °C	Desviación estándar	Valor de la mediana
A	30.4325	0.0947	0.4325
B	30.1039	0.0377	30.0955
C	29.8849	0.1803	29.9270
D	30.0534	0.0749	30.0955
E	29.6995	0.0825	29.7585
F	29.8006	0.1962	29.9270
G	29.8849	0.1325	29.9270
H	30.0955	0.0000	30.0955
I	29.9944	0.2862	30.0955
J	30.1039	0.0377	30.0955
K	30.0197	0.1391	30.0955
L	30.1039	0.0377	30.0955
M	29.8006	0.4159	29.9270
N	30.2387	0.0617	30.2640
Ñ	30.4325	0.0749	30.2640
O	30.1039	0.0000	30.2640

Tabla. 26. Datos estadísticos de los de temperaturas en los de interés cuando el motor esta en la posición 3 y la velocidad de agitador es de 153 RPM.

Puntos de interés	Valor promedio °C	Desviación estándar	Valor de la mediana
A	29.6743	0.4719	30.0955
B	30.1039	0.0377	30.2640
C	30.2387	0.0617	30.2640
D	30.2640	0.0000	30.0955
E	29.9607	0.3440	30.2640
F	30.2303	0.0692	30.2640
G	30.2387	0.0617	30.2640
H	30.2303	0.0692	30.1797
I	30.0702	0.2748	30.2640
J	30.2437	0.0907	30.2640
K	30.2387	0.0617	30.2640
L	30.2219	0.0927	30.0955
M	29.8343	0.4589	30.2640
N	30.2050	0.1369	30.1797
Ñ	30.1545	0.2802	30.4325
O	30.3398	0.1495	30.0955

10.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE TEMPERATURA

- El valor máximo de temperatura es de 30,4325 °C, la cual se presentó cuando el motor se encontraba en la posición 2 y el agitador tenía una velocidad de 152 RPM, exactamente en el punto A y la temperatura mínima 29.2698°C, cuando el motor se encontraba en la posición 1 y el agitador tenía una velocidad de 154 RPM en el punto D; lo cual nos indica que el aumento de temperatura en reactor de polimerización es independiente de las revoluciones, ya que los valores de temperatura son cercanos en diferentes revoluciones del sistema agitador.

- En la experiencia de toma de datos de temperatura en el reactor de polimerización con Carboximetil celulosa sódica al 1%, observamos que la diferencia de temperatura entre los diferentes puntos es aproximado de 1.5°C lo cual no cumple la teoría para que ocurra una transferencia de calor significativa tiene que haber una diferencia de temperatura mayor de 5°C. Se concluye que la transferencia de calor generada por el trabajo de eje (agitador) en el sistema es muy pequeña, para considerar que el fluido de trabajo es afectado por la misma.

- Los valores de temperaturas estuvieron cercano a la temperatura ambiente, esto muestra que la transferencia de calor transferencia de calor entre el reactor de polimerización y el medio ambiente es sumamente pequeña para considerarla.

- En la experiencia de toma de datos de temperatura, se tuvo en cuenta que el fluido es independiente del tiempo, es decir que sus propiedades no dependen del tiempo, pero no se descarta que ocurra transferencia de calor si el tiempo de funcionamiento es muy prolongado.

10.8 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA TOMAR LOS DATOS DE VELOCIDAD EN LOS PUNTOS DE INTERÉS

El objetivo de esta experimentación es medir la velocidad en todo los puntos de interés definidos en el reactor de polimerización con el fin de validar el modelo computacional del polímero fundido en un reactor de polimerización.

Las velocidades en el modelo experimental se medirán teniendo en cuenta que la velocidad del agitador de 154 RPM, esta velocidad fue la utilizada para el modelamiento computacional*.

10.8.1. Instrumentos y accesorios para medir velocidad. Para la realización de la experimentación se hace necesario los siguientes equipos y accesorios:

- Modelo experimental de reactor de polimerización (recipiente de acrílico, motor, estructura soporte del motor, tornillos de sujeción, sistemas de poleas y correas, aspas de agitación).
- Fluido de trabajo (Carboximetil celulosa sodica al 1 %). Cantidad 5.5 Litros.
- Motor de corriente continúa 100 RPM
- Multimetro digital TMC - 460

* NARVÁEZ CRUZ. OSORIO BENEDETTI, Alexander. Fabián. Desarrollo de un modelo computacional por elementos finitos para el estudio del comportamiento hidrodinámico de un polímero fundido. Cartagena, 2003, 120 h. Trabajo de Grado (ingeniería Mecánica). Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar. Facultad de Ingeniería Mecánica.

- Aspas de Bronce de 15 milésimas de espesor
- Cámara video. Samsug 800X
- Varilla sostenedora de motor (con abrazadera)
- Pila de 1.5 V UM-3 AA
- Manejo de datos (Análisis estadístico Matlab).

10.8.2. Pasos y definición de parámetros para medir velocidad. Para medir la velocidad se utilizara un método invasivo en el fluido el cual consistirá en introducir un motor de corriente continua encendido con un aspa en el fluido de trabajo y se medirá el amperaje utilizando un multímetro, se relacionara el valor de amperaje con la velocidad de la siguiente forma, al introducir el motor sin que el agitador se encuentre funcionando(velocidad del fluido cero), se tomara el amperaje en estas condiciones y luego colocando el amperímetro lo más cercana al aspas del rodete(velocidad máxima del fluido) medir el amperaje del motor y buscar una relación lineal entre estos datos; después el motor se colocará en los puntos de interés y se tabularan los valores de amperajes y con la ecuación lineal buscar los valores de la velocidad. Es necesario comparar los datos de velocidad tomado de la experiencia con los valores teorices de velocidad y buscar el porcentaje de error, luego comparar los datos de velocidad del modelo experimental con los datos de velocidad del modelo computacional.

- Preparación del fluido de trabajo, CMC 48 horas antes de la realización del experimento.
- Montaje del modelo experimental del Reactor de Polimerización.

- Calibración de multímetro digital.
- Los datos serán organizados en tablas.
- Aplicar Software Matlab para manejo estadísticos de datos.
- Comparación de datos de velocidad con el modelo Teórico.
- Comparación de datos de velocidad con el modelo computacional.

Experiencia. Para medir la velocidad solamente se ubicara el motor en la posición 1 con velocidad del agitador será de 154 RPM, debido a que esta es la utilizada para hacer el modelamiento computacional del reactor de polimerización.

Para buscar la relación lineal entre la velocidad del fluido y la el amperaje del motor es necesario buscar las condiciones máximas de velocidad del fluido el cual basado en los conceptos teóricos de agitador es un 70% menos que la velocidad del rodete el cual tiene un valor de 0.07224 m/s e inmediatamente se toma el amperaje del motor de corriente continua el cual tiene un valor de 0.11 amperio. Para la condición mínima es necesario introducir el motor de corriente continua, sin que el agitador este en movimiento y tabular el valor de amperaje cuyo valor fue de 0.18 amperios.

Tabla 27. Valores de velocidad máximo y mínimo para buscar la ecuación lineal entre la velocidad del fluido y el amperaje del motor de corriente continua.

Velocidad(m/s)	Amperio(A)
0	0.18
0.07224	0.11

Se busca la pendiente de con los puntos de la tabla 27.

La pendiente tendrá un valor de:

$$M = 0 - 0.07224/0.18 - 0.11 = - 1.032$$

Ecuación lineal que relacional velocidad del fluido con el amperaje del motor de corriente continua será:

$$Y - 0.07224 = -1.032(X-0.11)$$

$$y = -1.032X + 0.1857, \text{ Ecuación (1)}$$

De aquí se procede a tomar los datos de amperaje en los puntos de interés como se muestra en la tabla 28.

Tabla. 28. Datos de amperaje tomado en los puntos de interés.

Puntos de interés	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AM	0.15	0.16	0.17	0.16	0.16	0.16	0.15	0.16	0.16	0.16
BN	0.13	0.12	0.13	0.15	0.11	0.12	0.11	0.12	0.12	0.13
CN	0.18	0.16	0.17	0.18	0.16	0.17	0.18	0.17	0.17	0.16
DO	0.11	0.12	0.11	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.12
EI	0.16	0.16	0.18	0.17	0.16	0.16	0.15	0.17	0.18	0.18
FJ	0.12	0.11	0.12	0.12	0.11	0.13	0.11	0.11	0.12	0.12
GK	0.17	0.17	0.18	0.16	0.17	0.17	0.16	0.16	0.16	0.17
HL	0.11	0.11	0.12	0.11	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11	0.12

Es necesario buscar los valores promedios de amperaje con el fin de hallar la velocidad como se muestra en la tabla 30.

Tabla 29. Valores estadísticos de amperaje en el motor de corriente continua en los puntos de interés.

Puntos de interés	Valor promedio	Desviación estándar	Valor de la mediana
AM	0.1590	0.0057	0.1600
BN	0.1230	0.0095	0.1200
CÑ	0.1710	0.0088	0.1700
DO	0.1140	0.0052	0.1100
EI	0.1670	0.0106	0.1650
FJ	0.1170	0.0067	0.1200
GK	0.1670	0.0067	0.1700
HL	0.1140	0.0052	0.1100

Utilizando la ecuación (1), calculan los valores de velocidad en los puntos de interés.

Tabla 30. Valores de velocidades en los puntos de interés utilizando los valores promedios de amperaje.

Puntos de interés	Valor promedio amperaje	Valores de velocidad(m/s)
AM	0.1590	0,021612
BN	0.1230	0,058764
CÑ	0.1710	0,009228
DO	0.1140	0,068052
EI	0.1670	0,013356
FJ	0.1170	0,064956

GK	0.1670	0,013356
HL	0.1140	0,068052

Se compara los valores de velocidad tomados del modelo experimental con los valores de velocidad teóricos (ver capítulo 2, página 79).

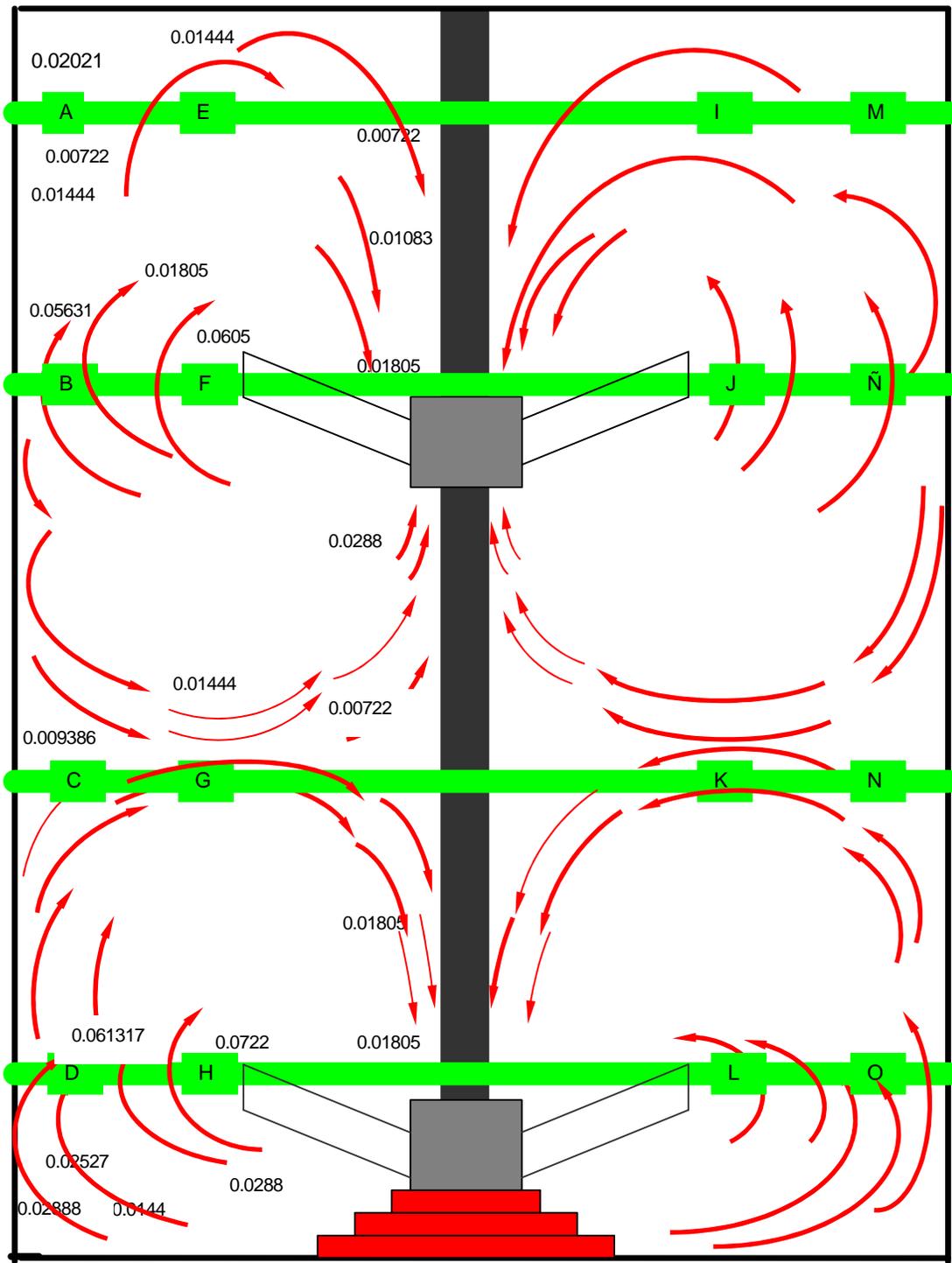
Tabla31. Comparación de datos experimentales de velocidad con datos modelo teórico basado en la teoría de diseño de agitadores.

Puntos de interés	Valor de velocidad modelo teórico	Valores de velocidad(m/s)	% Error
AM	0.02021	0,021612	6.90
BN	0.05631	0,058764	4.3
CN	0.009386	0,009228	1.6
DO	0.061317	0,068052	10.8
EI	0.0144	0,013356	6.25
FJ	0.0605	0,064956	7.2
GK	0.0144	0,013356	7.6
HL	0.0722	0,068052	5.8

El porcentaje de error se tomara primando los datos teóricos, debido a su mayor fiabilidad, la formula de porcentaje de error queda:

$$\% \text{ Error} = \frac{\text{Valor Teorico} - \text{Valor Experimental}}{\text{Valor Teorico}} \times 100$$

Figura 34. Trazado de distribución de velocidades teóricas para el diseño de agitadores y zonas de interés para la medición experimental de la misma.



Para comprobar el modelo computacional se compara los valores de velocidad del modelo experimental con el modelo computacional de reactor de polimerización. Como se indica en la tabla 32.

Tabla 32. Comparación de datos experimentales de velocidad con datos modelo Computacional.

Puntos de interés	Valor de velocidad modelo experimental	Valores de velocidad absoluta modelo computacional(m/s)	% Error
AM	0,021612	0,0124904	42
BN	0,058764	0,047293	19.5
CÑ	0,009228	0,014553	57
DO	0,068052	0,086515	27
EI	0,013356	0,007013	38
FJ	0,064956	0,010366	27.7
GK	0,013356	0,028548	20
HL	0,068052	0,7369797	48.52

Ver anexo N. Valores de velocidad de modelo computacional

El porcentaje de error se calculara utilizando la siguiente formula:

$$\%Error = \frac{Valor\ experimental - Valor\ computacional}{Valor\ experimental} \times 100$$

Esta formula indica que se va a calcular el porcentaje de error , priorizando los datos experimentales de velocidad, indicando que son de cierta manera confiables.

10.9 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE VELOCIDAD

En la anterior experiencia se observó que las comparaciones de los datos de velocidad en el modelo experimental del reactor de polimerización y los datos teóricos, arrojaron porcentajes de error bajos, lo que nos indica que la relación lineal entre el amperaje del motor de corriente continua y la velocidad del fluido es acertada.

Los datos de velocidad tomados del modelo experimental comparado con los datos de velocidad del modelo computacional muestran un porcentaje de error alto, lo que indica que los modelos no convergen.

La toma de los datos de velocidad en el modelo experimental del reactor de polimerización se utilizó método de medición invasivos por ende. Al usar dicho método se establece una perturbación en el comportamiento hidrodinámico del fluido.

Se observó una simetría en los puntos de interés equidistantes del eje del agitador, debido a que los valores de velocidad del fluido en dichos puntos eran iguales.

10.10 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA TOMAR LOS DATOS DE PRESIONES EN LOS PUNTOS DE INTERÉS

Para la toma de los datos de velocidad se hará de una manera indirecta, es decir utilizando otras propiedades como en este caso la velocidad y empleando una fórmula calculamos la velocidad en los puntos de interés.

Para calcular la velocidad recurrimos al concepto de presión de arrastre*, la cual plantea que debido a disturbios en la corriente del fluido conforme este paso por un cuerpo, crea una excitación turbulenta. La presión en la excitación es relativamente que en el punto de estancamiento en el frente del cuerpo. Una fuerza neta por lo tanto creada, la cual actúa en dirección opuesta a la del movimiento. Esta fuerza es la presión de arrastre.

$P_{\text{arrastre}} = C_D (\rho v^2/2)$, siendo C_D el coeficiente de arrastre, v la velocidad del fluido, ρ la densidad del fluido.

Utilizando los valores de velocidad en los puntos de interés tomados de la experiencia calcularemos la velocidad en cada punto.

La constante C_D se tomará teniendo en cuenta la forma de las aspas utilizadas en la experiencia. Ver anexo O. Coeficiente de arrastres típicos.

Tabla 33. Presión en los puntos de interés calculados

Puntos de interés	Valores de velocidad modelo experimental(m/s)	Valores de presión en los puntos de interés (N/m ²)
AM	0,021612	0,39191
BN	0,058764	2,90425
CÑ	0,009228	0,071531
DO	0,068052	3,890103
EI	0,013356	0,149841
FJ	0,064956	3,544197
GK	0,013356	0,149841
HL	0,068052	3,890103

* MOTT, Rober. Mecánica de fluidos aplicada. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. México, 1996. Pág. 469.

El valor de C_D tomara un valor de 1.6 considerando que la forma del aspa es un cilindro un cilindro triangular, el valor de la densidad del fluido es de 1050 Kg/m^3 y las velocidades tomados en el modelo experimental.

Es necesario comparar los valores de presión del modelo experimental con los del modelo computacional, pero los valores de presión el modelo computacional arrojaron datos erróneos no es posible hacer dicha comparación.

10.11. ANALISIS DE RESULTADOS DE PRESIÓN

Para el medir la presión en los puntos de interés se hizo uso de la teoría de presión de arrastre y se tomo los valores de velocidad experimentales en el reactor de polimerización.

La presión medida representa la presión dinámica del fluido y la presión estática.

No fue posible hacer una comparación con entre los valores de presión del modelo experimental con los valores de presión del modelo computacional debido a que en el modelo computacional los valores de presión dados fueron totalmente erróneos.

11. LINEAS DE FLUJOS EN EL MODELO EXPERIMENTAL DE REACTOR DE POLIMERIZACIÓN UTILIZANDO TRAZADORES

11.1. OBJETIVO DE LA EXPERIMENTACIÓN DE USO DE TRAZADORES

Determinar las líneas de flujos que se generan en el modelo experimental de un reactor de polimerización, mediante el uso de sustancias trazadoras de fluidos.

11.2. MATERIALES Y EQUIPOS PARA REALIZAR LA EXPERIENCIA DE USO DE TRAZADORES

- Reactor De Polimerización.
- Carboximetil Celulosa Sodica A 1%(CMC). 5,5 Litros
- Tasador Colorante Rojo Escarlata. (Rojo de metileno)
- Cámara Fotográfica
- vides Cámara Samsug 800X.
- Focos de luz blanca.

11.3. PROCEDIMIENTO PARA USAR TRAZADORES

- Preparación de Carboximetil celulosa sodica al 1% en agua destilada.
- Colocar el reactor de polimerización en un cuarto oscuro y iluminarlo con luz blanca.

Ver Anexo S.

- Fotografía de reactor de polimerización con CMC al 1%.

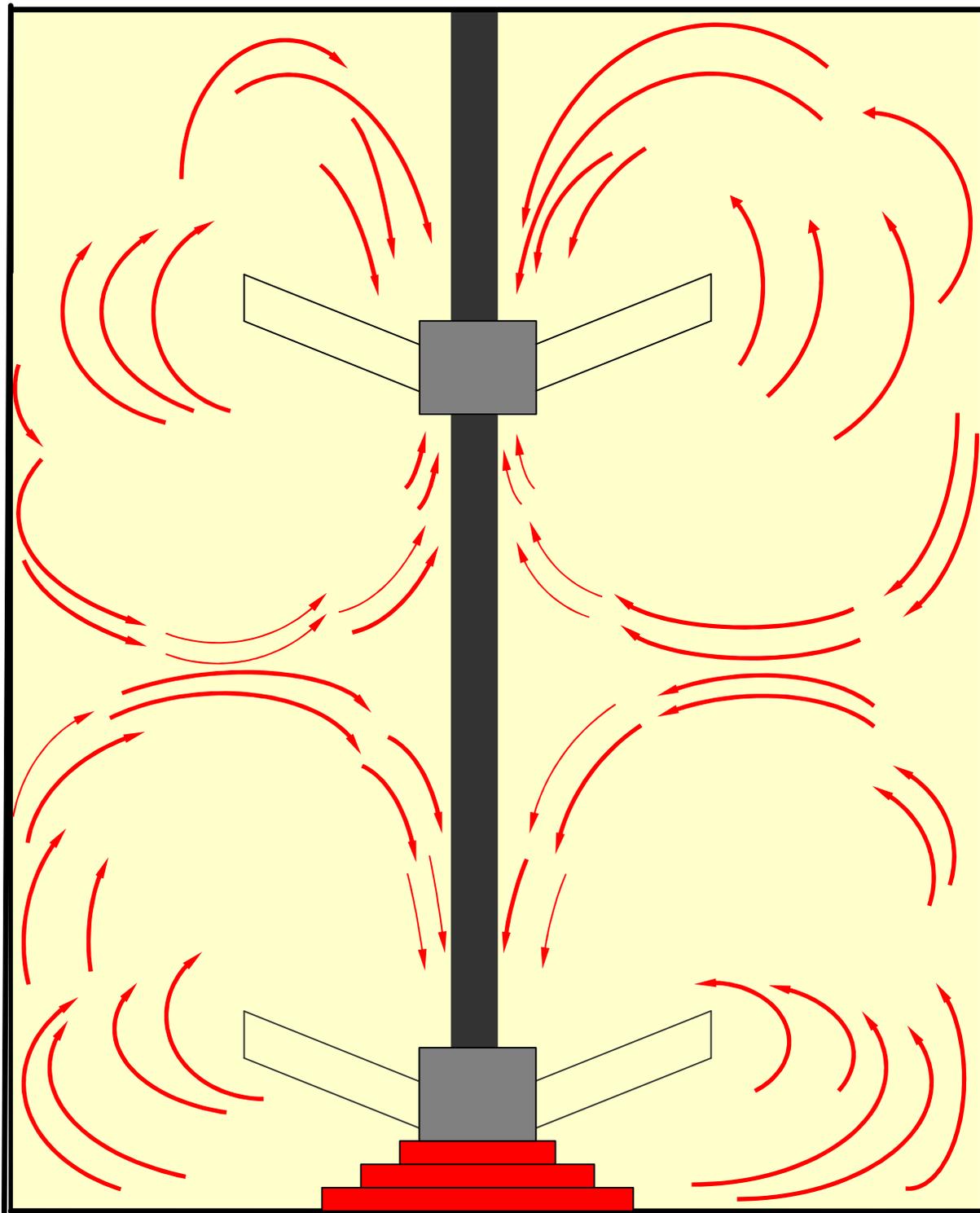
- Con la filmadora hacer una tomas del reactor de polimerización agitando el fluido de trabajo. Se debe variar la velocidad del motor.
- Fotografías del reactor de polimerización funcionando.
- Cuando el reactor de polimerización este funcionando agregarle el trazador, grabar con la filmadora y tomar fotografía.

11.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIENCIA CON TRAZADORES

En el flujo en el reactor de fluye en dirección del movimiento de las aspas del rodete, ocasionando esto una disminución de la velocidad relativa entre las aspas y el fluido de trabajo, observamos que en el rodete se forma una vació y por las salidas un aumento en la velocidad de fluido que se estrella en las paredes del reactor, saliendo una corriente para arriba y otra corriente de hacia abajo; esto ocurre en la aspa superior como inferir, en el centro de el tanque se nota una zona donde se encuentran los dos flujos el que viene por abajo y el que viene por arriba, esta zona se considera de mayor agitación ya que se encuentran dos líneas de fluido.

En esta experiencia no se aparecieron los vórtices en la parte superior del tanque, ya que como las velocidades que giraban el agitador no ocasionaban este fenómeno, es por esto que cumple con la condición que el fluido de trabajo en el agitador este en régimen laminar, el cual garantiza que los datos tomados sean certeros.

Figura 35. Líneas de flujo en el modelo experimental del reactor de polimerización.



CONCLUSIONES

Para realizar el modelo experimental de un equipo, maquina o sistema es necesario estudiar las condiciones que rigen al mismo y mantener equivalencias como lo son las semejanzas geométrica, dinámica y cinemática, con el fin de conservar una similitud cercana entre el prototipo y el modelo experimental.

Cuando en un modelo experimental existe la presencia de un fluido se debe hacer un estudio reologico, por que éste ayuda a definir que tipo de fluido es y cual va hacer su comportamiento. El fluido de trabajo escogido Carboximetil celulosa sódica al 1% después de realizar en él un estudio reologico, arrojó resultados que permitieron definirlo como un fluido con características poliméricas y comportamiento no Newtoniano.

Los datos de temperatura obtenidos en el modelo experimental del reactor de polimerización presentaron incrementos de temperatura en el fluido de trabajo de 1.2 °C, con respecto a la temperatura ambiente, lo que permite afirmar que la transferencia de calor en el reactor de polimerización es muy pequeña como para considerarla relevante en el estudio hidrodinámico.

Los datos de velocidad tomados en el modelo experimental, comparados con los datos de velocidad teóricos (según teoría de agitadores) guardan cierta similitud , debido a que sus porcentajes de error fueron bajos, caso contrario ocurrió con la

comparación con los datos de velocidad del modelo computacional, lo que indica que el modelo computacional no se ajustó al modelo experimental.

Los datos de presión del modelo experimental obtenidos a partir de los conceptos de Arrastre y sustentación basados en la hidrodinámica, no pudieron ser comparadas con las presiones del modelo computacional, debido a que en éste modelo dichos datos fueron erróneos.

RECOMENDACIONES

Para la toma de datos de las variables es preferible utilizar instrumentos de medición no invasivos, el cual permitiría que no ocurrieran perturbaciones en el sistema durante su operación.

En la validación de un modelo experimental por medio de un modelo computacional se hace necesario trabajar con cierto paralelismo, para que progresivamente se realice una comparación de datos que permita ajustar y direccionar los procedimientos.

Para la toma de datos de velocidad del fluido en el modelo experimental se hizo uso de un instrumento de medición que no era el óptimo para dicho fin, recomendamos utilizar galgas extensiométricos (strain gage), por proporcionarnos una mayor precisión en los datos y el uso de conceptos de mecánica de fluidos relacionados con conceptos de mecánica de materiales. Además la tarjeta de adquisición de datos fue diseñada con puerto de entrada para recibir las señales de este dispositivo generaría.

BIBLIOGRAFIA

BEER, Ferdinand, JHONSTON, Russell. Mecánica de materiales. Primera edición. Santa Fe de Bogotá DC: Mc Graw-Hill, 1982. Pág 38.

CABE, Mc. Operaciones Unitarias. Cuarta edición. Méjico DF: Editorial Prentice Hall, 1998. Pág 252-293.

COUGHHLIN, Robert F, DRISCOLL Frederick F. Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales. Cuarta edición. Méjico DF: Editorial Prentice Hall, 1993. Pág 11-71.

MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos aplicada. Cuarta edición. Editorial Prentice Hall, 1996. Pág 467-474.

MULLER, H.G. Introducción a la reología de los alimentos. Cuarta Edición. Editorial Acribia, 1997. Pág 75-93.

NARVÁEZ CRUZ. OSORIO BENEDETTI, Alexander. Fabián. Desarrollo de un modelo computacional por elementos finitos para el estudio del comportamiento hidrodinámico de un polímero fundido. Cartagena, 2003, 120 h. Trabajo de Grado (ingeniería Mecánica). Corporación Universitaria Tecnológica de Bolívar. Facultad de Ingeniería Mecánica.

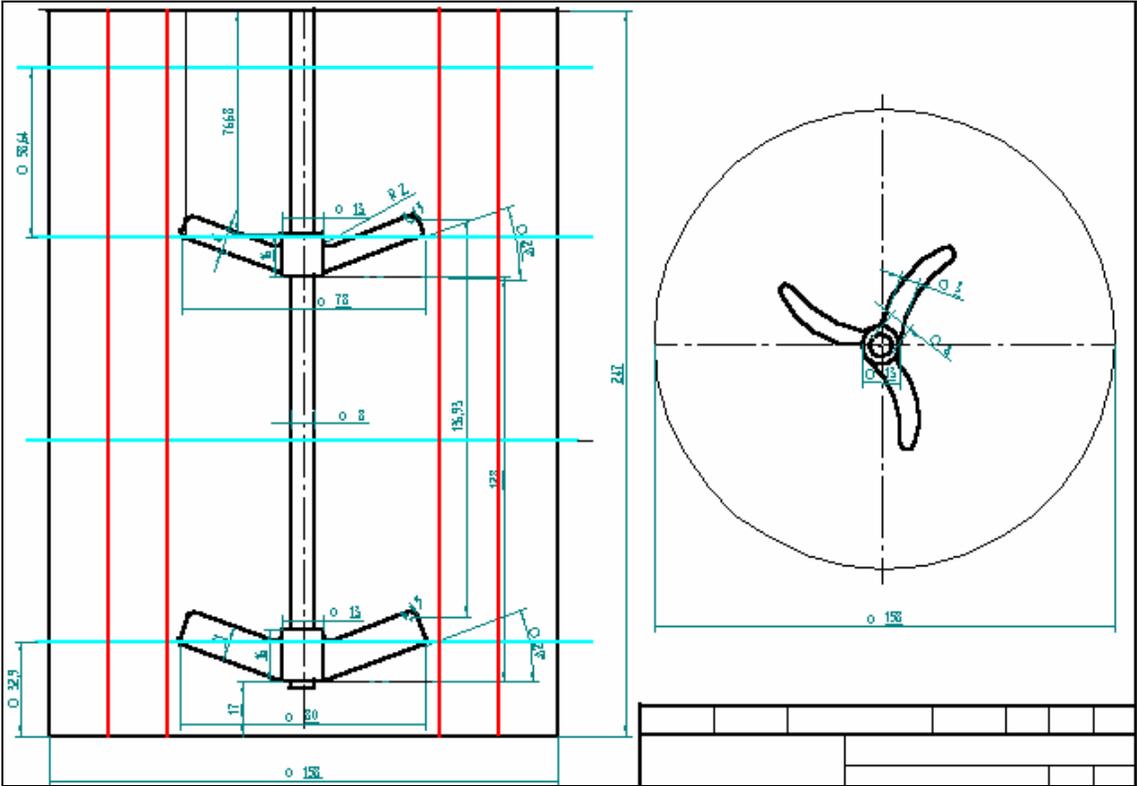
OTTO, Kevin, WOOD, Kristin. Product design. Editorial Prentice Hall, 2001. Pág 891-1010.

PERRY, C.C, LISSNER, H.R. The strain gage primer. Segunda edición. The united status of América: Mc Graw-Hill, 1999. Pág 1-332.

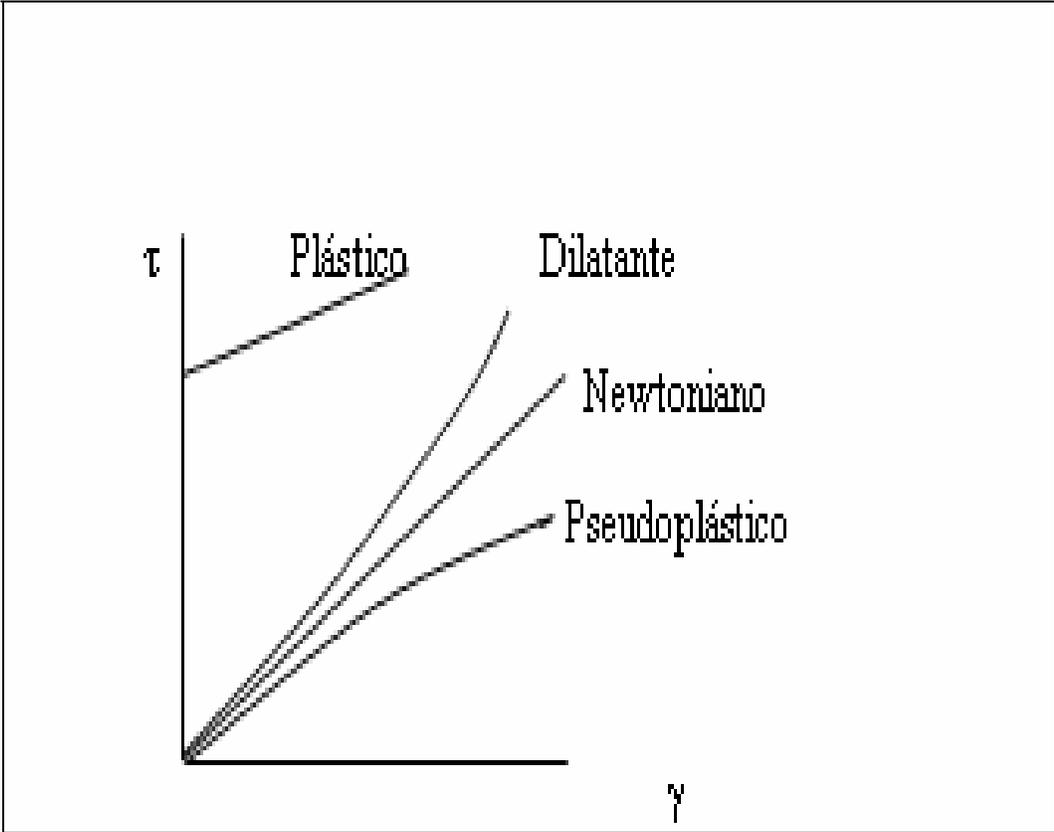
SHIGLEY, Joseph, MISCHKE Charles. Diseño en ingeniería mecánica. Quinta edición.
México DF: Mc Graw-Hill, 1998. Pág 860.

STREETER, Victor, WYLIE, Benjamín, BEDFORD, Keith. Mecánica de fluidos.
Novena edición. Santa Fe de Bogotá : Editorial Mc Graw-Hill, 1999. Pág 696-701.

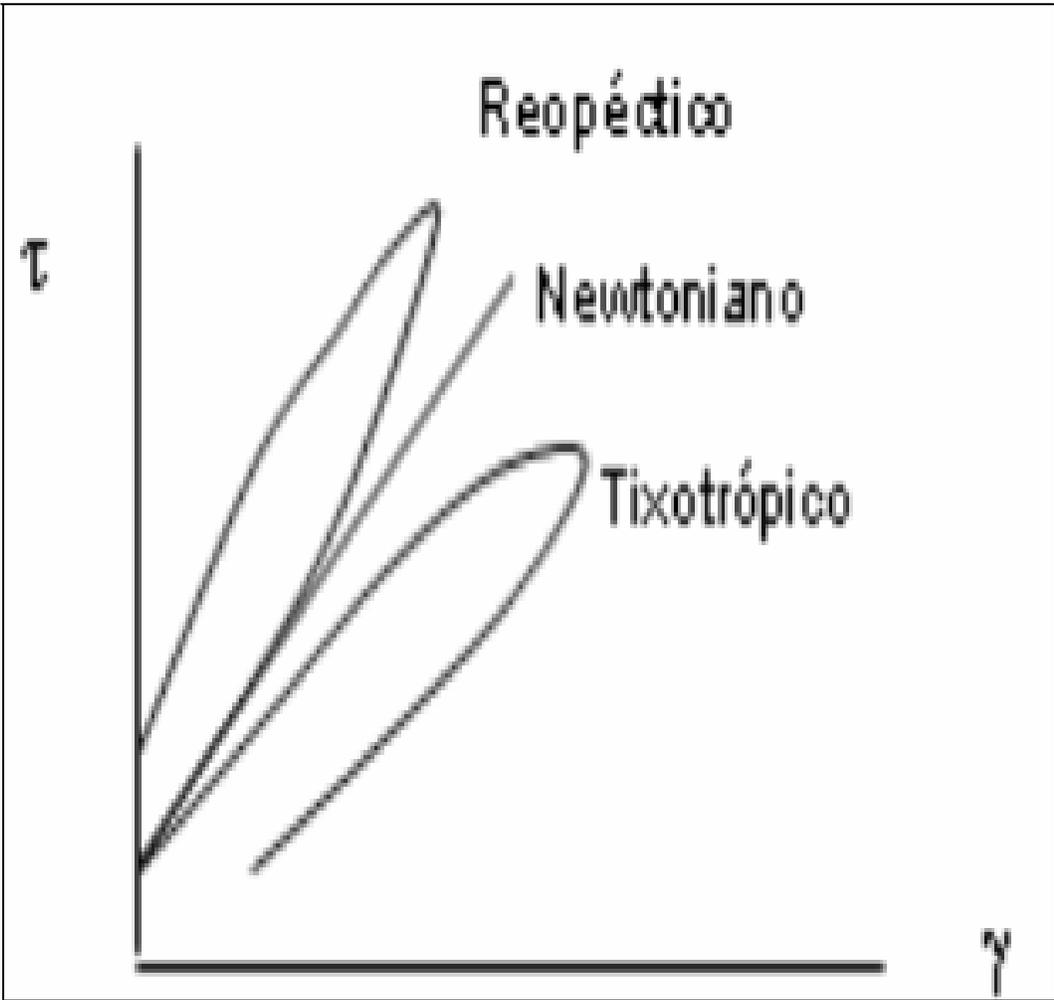
Anexo A. Reactor de Polimerización



Anexo B. Tipos de fluidos



Anexo C. Fluidos dependientes del tiempo



Anexo D. Análisis Físicoquímicos practicados a una muestra de Carboximetil celulosa Sodica.



UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FUNDADA EN 1827

Cartagena, 19 de Febrero de 2003

Señor
JAIRO USECHE VIVERO
Ciudad

Apreciado señor:

A continuación le informamos el resultado de los análisis físicoquímicos practicados a una muestra de Carboxi Metil Celulosa, tomada y traída por usted, según su solicitud de febrero 14/2003.

MUESTRA DE CARBOXI METIL CELULOSA

Parámetro	Resultado
Densidad (g/ml)	1.05
Viscosidad (cp)	653

DATOS DE LA CURVA REOLÓGICA DE LA CMC

Peso (g)	t (seg)	r.p.s.
92.6992	30.07	0.831
102.6983	26.57	0.9409
112.6997	22.29	1.121
122.6995	19.72	1.267
142.6986	14.71	1.7001
192.6978	7.905	3.1625

GABRIEL ACEVEDO DEL RÍO, Q.F.
Jefe Dpto. de Química

JAIRO E. MERCADO CAMARGO, Q.F.
Docente analista

PRISCILIANO MARTÍNEZ PARRA, Q.F.
Decano Fac. de Ciencias Químicas y Físicas

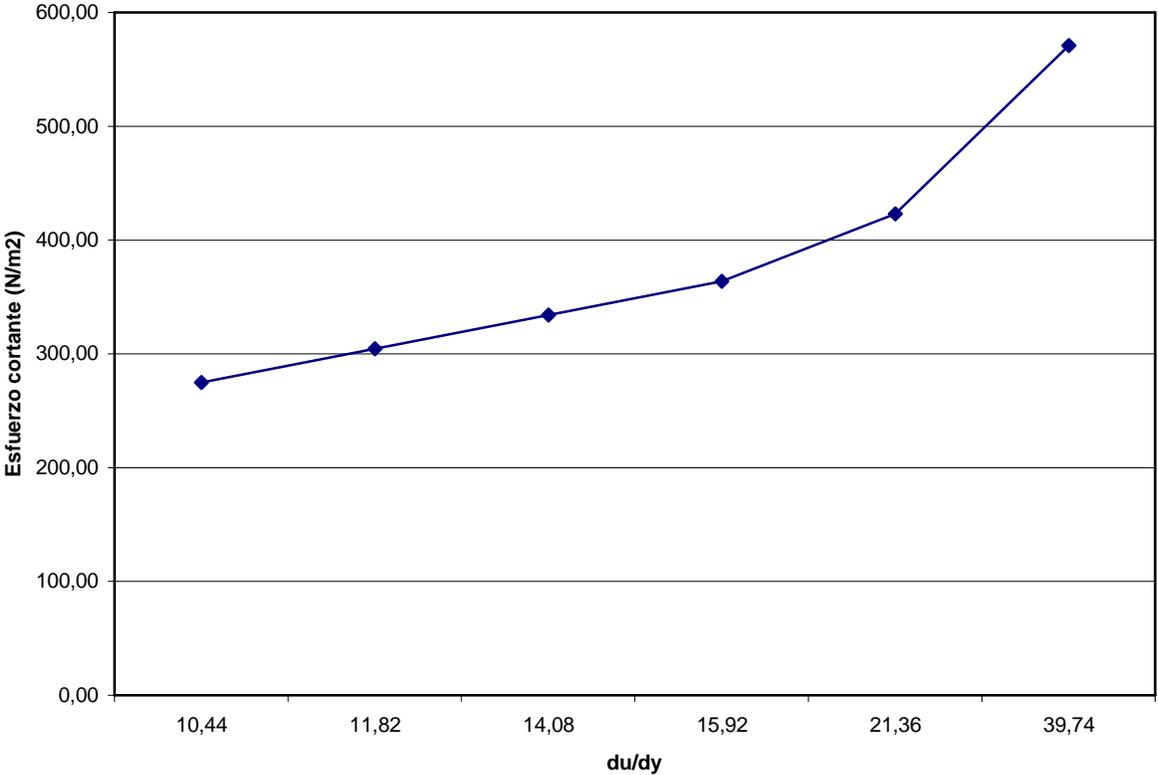
Teléfonos 6698179 - 180 Fax 6698323

LICENCIA NAL. DE FUNCIONAMIENTO DE MINSALUD No. 752 DE NOV. 24/1988

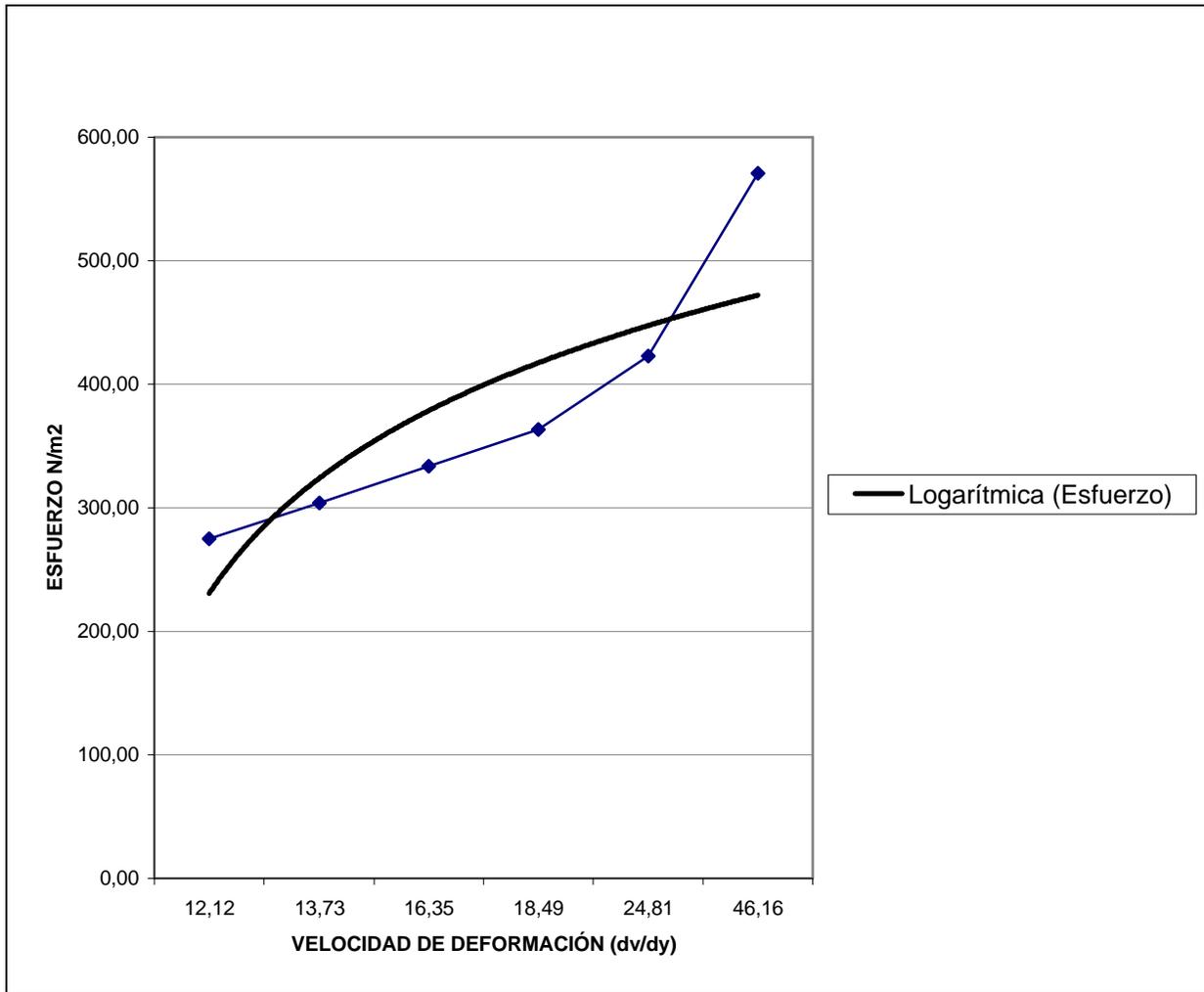
¡ Siempre a la altura de los tiempos !

Centro, Carrera 6 No. 36-100 Teléfonos: 6600677 - 6600681 - 6600682 Fax: 6600380 Apartado Aéreo No. 1382 Postal No. 195
CARTAGENA DE INDIAS D.T. y C. - COLOMBIA S.A.

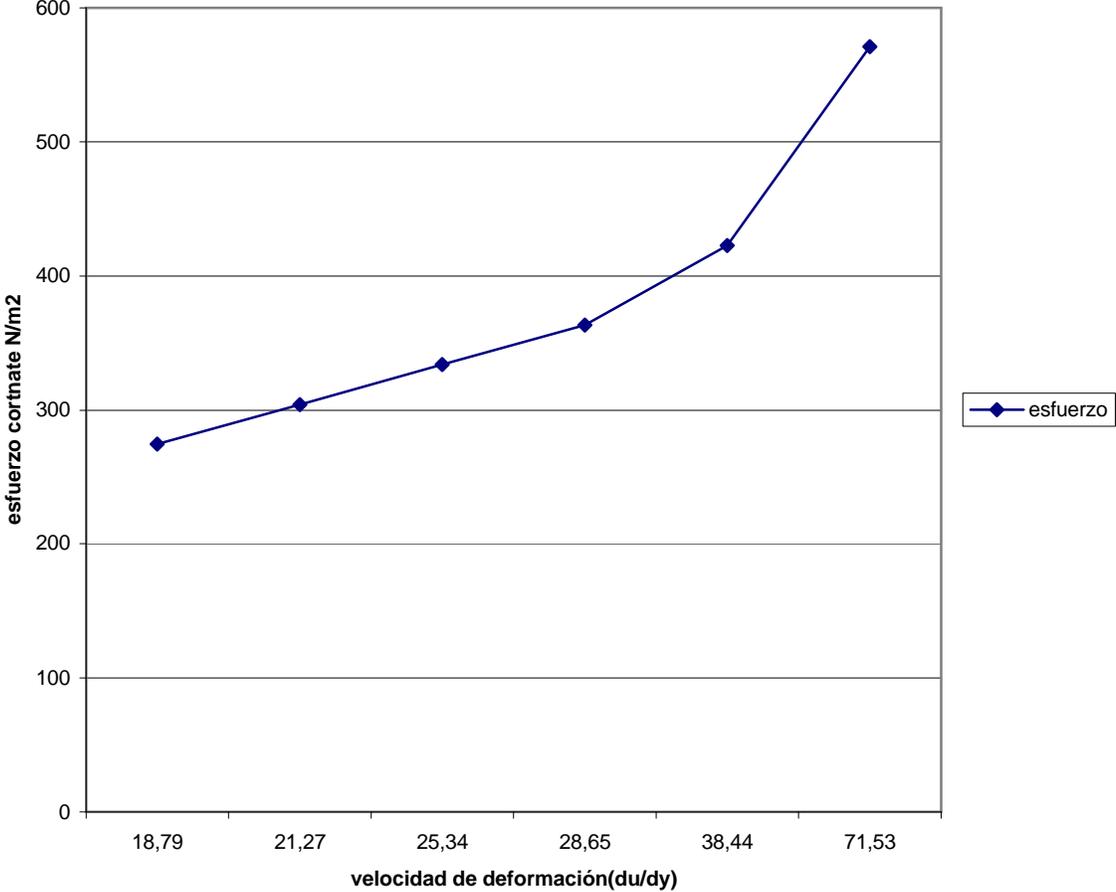
Anexo E. Esfuerzo contra velocidad de deformación según el criterio de gradiente de velocidad uniforme



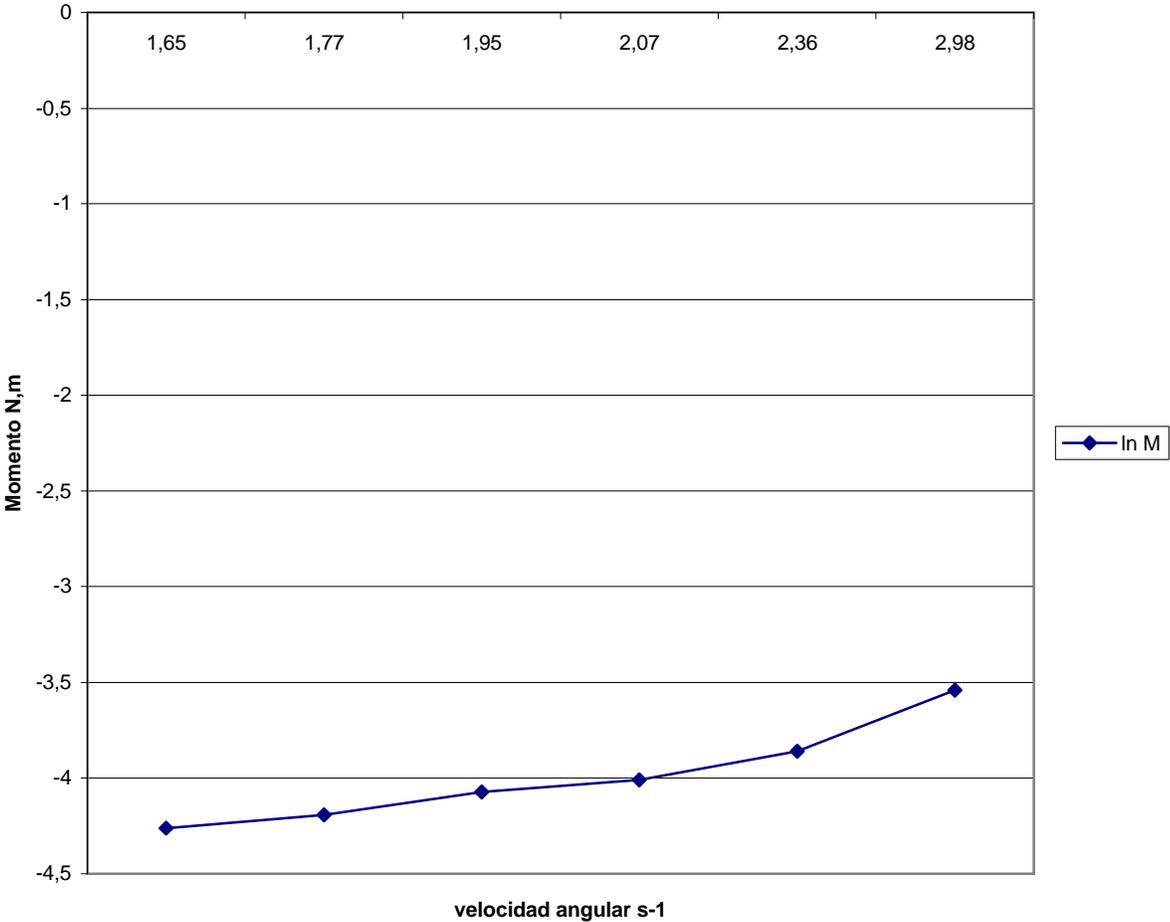
Anexo F. Grafica de esfuerzo contra velocidad de deformación del CMC 1% según criterio de fluido homogéneo con muy finas partículas en suspensión



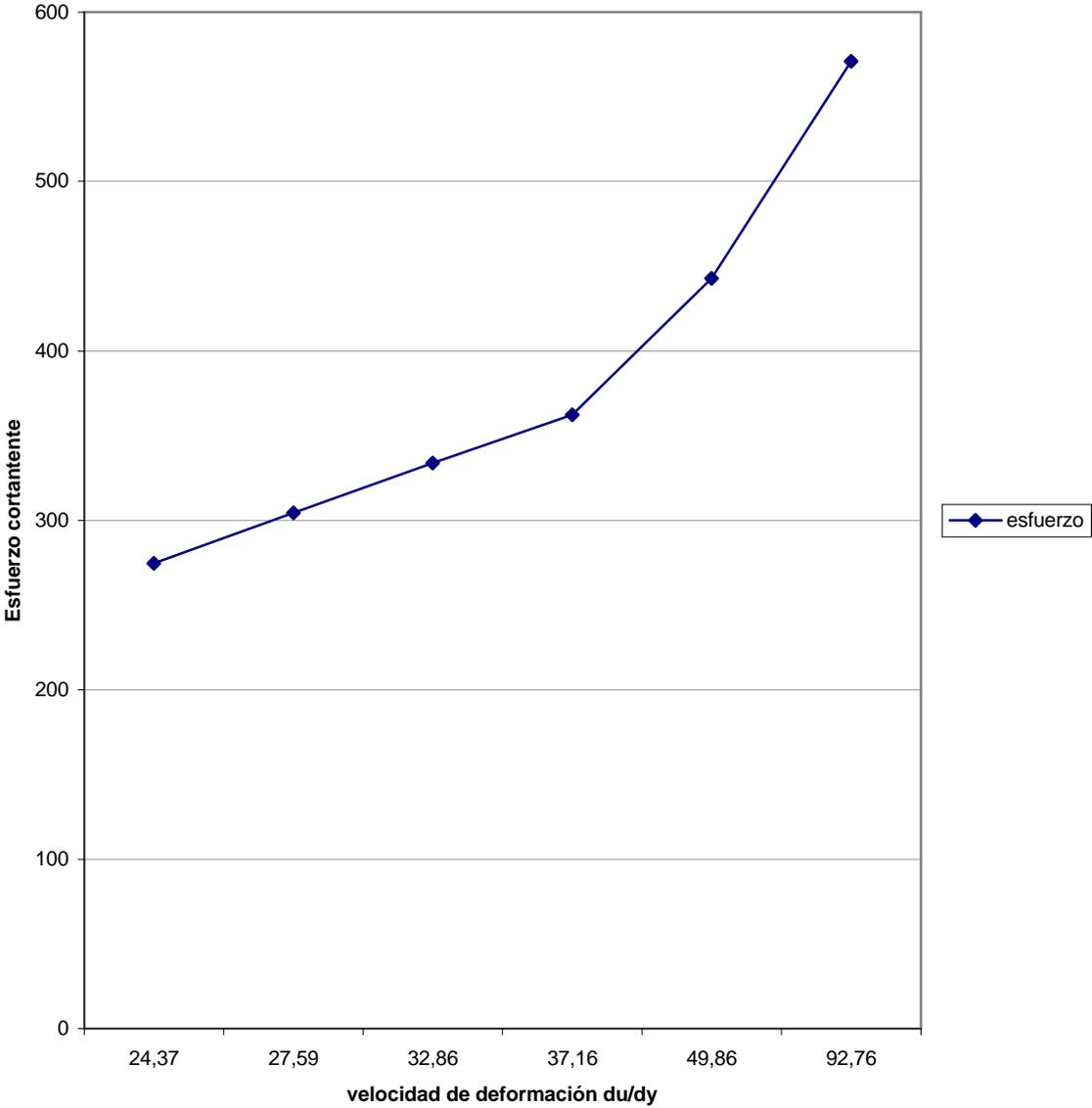
Anexo G. Grafica esfuerzo contra deformación según criterio de fluido newtoniano



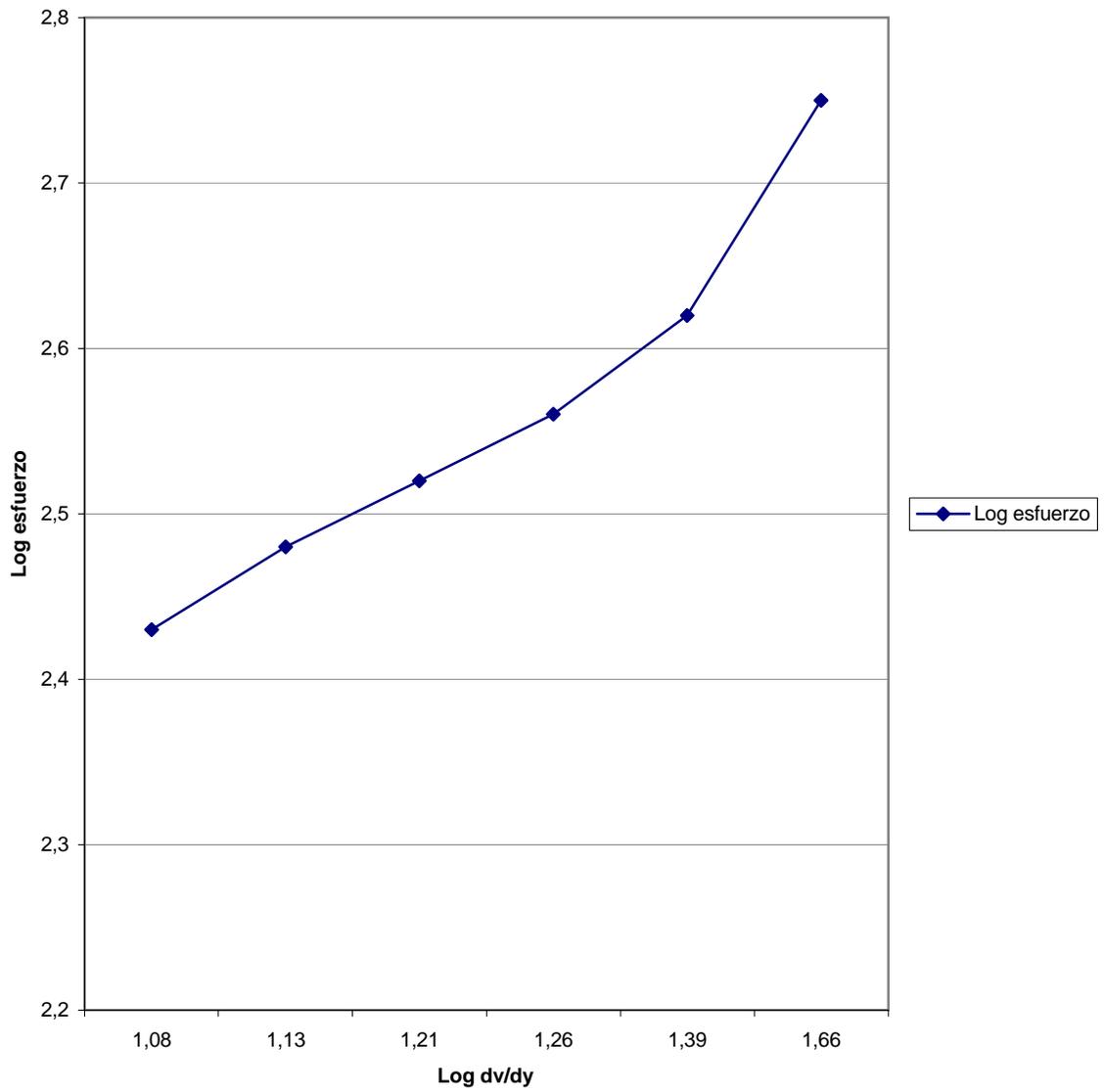
Anexo H. Grafica ln M contra ln Velocidad angular para calcular el valor de n según criterio ley de potencia.



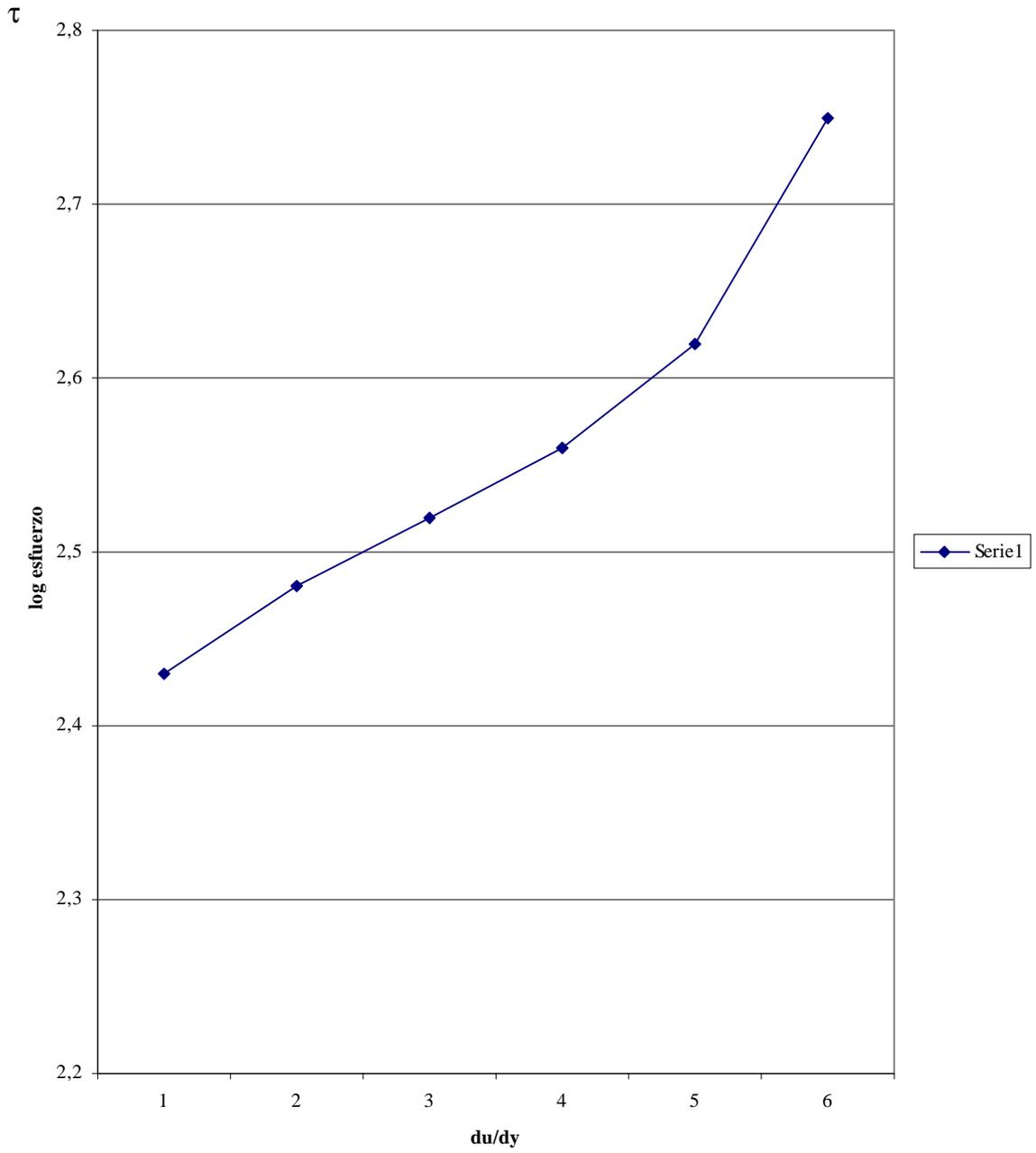
Anexo I. Grafica esfuerzo contra velocidad de deformación según criterio ley de potencia



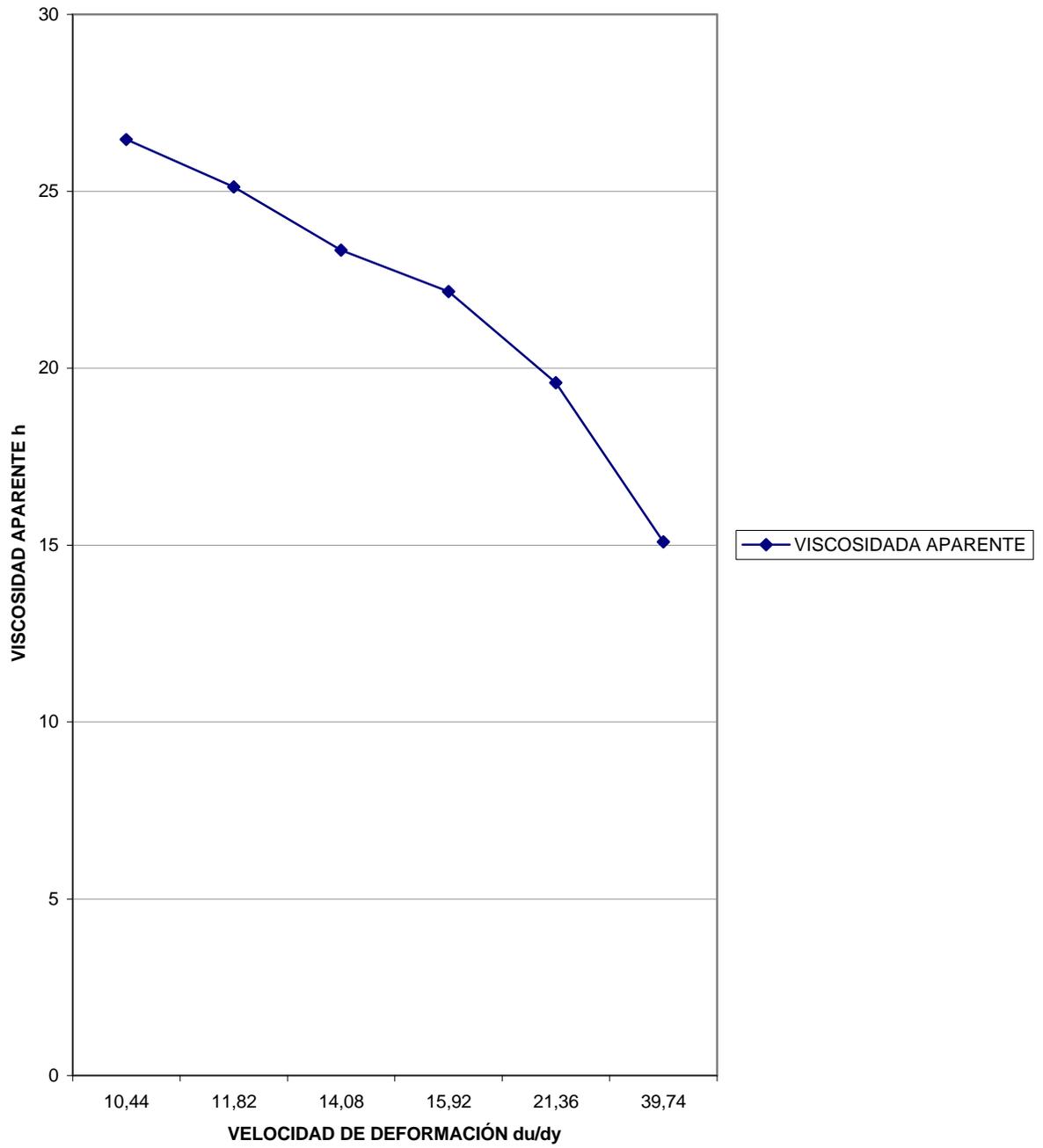
Anexo J. Gráfica Log τ contra Log du/dy según criterio fluido homogéneo



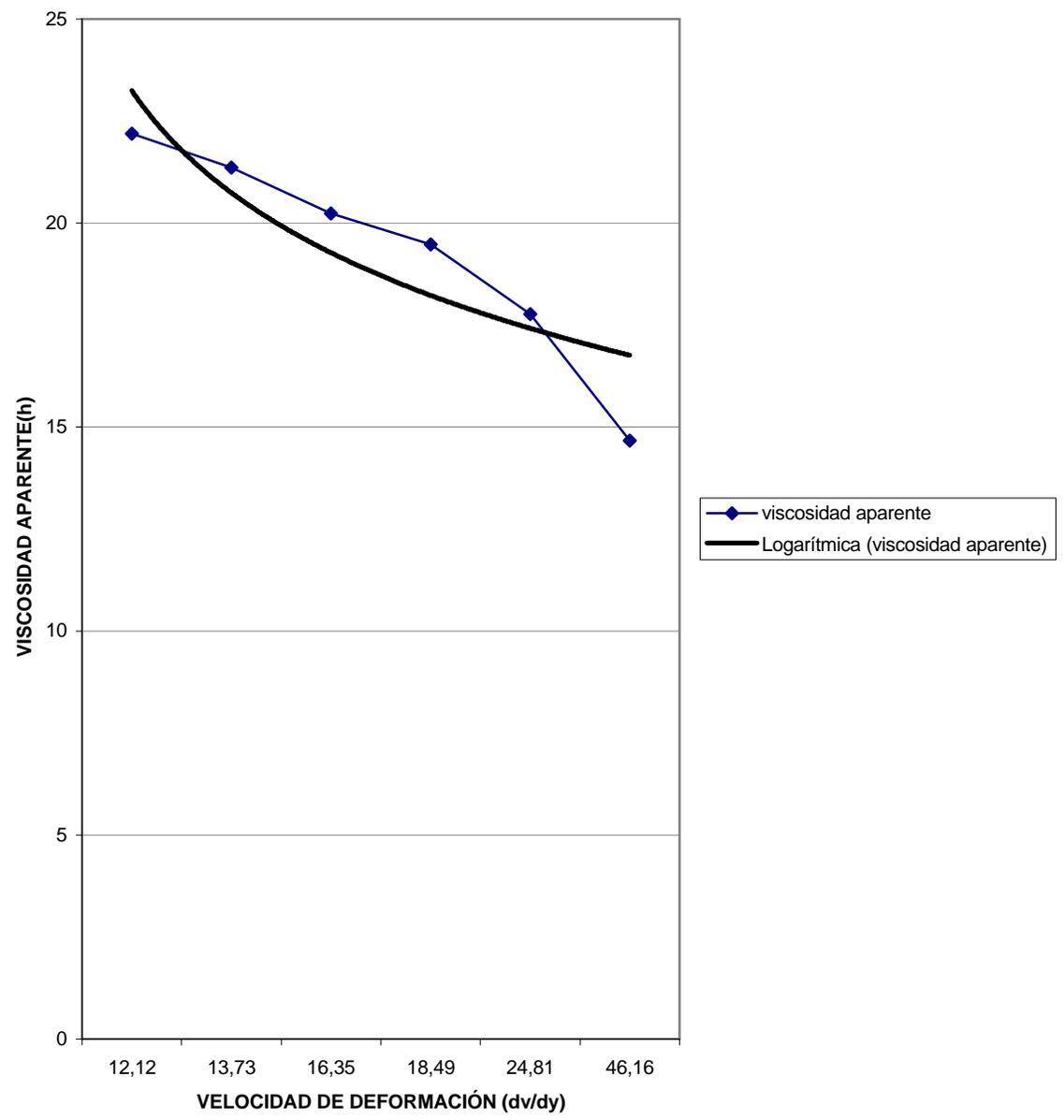
Anexo K. Grafica Log τ contra Log du/dy según criterio velocidad uniforme



Anexo L. Viscosidad aparente contra velocidad de deformación criterio velocidad uniforme



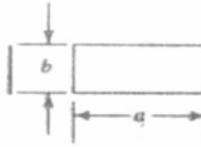
Anexo M. Comportamiento de la viscosidad aparente es inversamente proporcional al de la velocidad de deformación según criterio de fluido homogéneo



Anexo N. Valores de velocidad de modelo computacional.

VALORES PARA EL MODELAMIENTO DEL REACTOR COMPLETO CON 107190 ELEMENTOS						
	NODO CERCANO	RADIO (m)	rpm	w (Rad/s)	VEL. REL. (m/s)	VEL. ABS. (w*r + VEL. REL.)
A	6961	0,05992	154	16,13	-0,979	-0,0124904
B	19550	0,0639	154	16,13	-1,078	-0,047293
C	14198	0,0619	154	16,13	-1,013	-0,014553
D	23157	0,0655	154	16,13	-0,97	0,086515
E	8234	0,0499	154	16,13	-0,8119	-0,007013
F	19588	0,0518	154	16,13	-0,8459	-0,010366
G	13575	0,0504	154	16,13	-0,8415	-0,028548
H	20695	0,04569	154	16,13	0	0,7369797
I	7823	0,06037	154	16,13	-0,98195	-0,0081819
J	20420	0,065	154	16,13	-1,0665	-0,01805
K	14516	0,061	154	16,13	-1	-0,01607
L	22801	0,0651	154	16,13	-0,949	0,101063
M	6864	0,0487	154	16,13	-0,7843	0,001231
N	19512	0,0492	154	16,13	-0,7964	-0,002804
Ñ	14734	0,0471	154	16,13	-0,7839	-0,024177
O	20650	0,04569	154	16,13	0	0,7369797

Anexo O. Coeficiente de arrastres típicos

Forma del cuerpo	Orientación	C_D	
Cilindro cuadrado	Flujo → 	1.60	
Cilindros semitubulares	→ 	1.12	
	→ 	2.30	
Cilindros triangulares	→ 	1.05	
	→ 	1.85	
	→ 	1.39	
	→ 	2.20	
	→ 	1.60	
	→ 	2.15	
	→ 	1.75	
	→ 	2.05	
Placa rectangular	Flujo → 	a/b 1	1.16
		4	1.17
		8	1.23
		12.5	1.34
		25	1.57
		50	1.76
		∞	2.00
Discos en tándem L = espaciamiento d = diametro	→ 	L/d 1	0.93
		1.5	0.78
		2	1.04
		3	1.52
Un disco circular	→ 	1.11	