

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA LA SELECCIÓN Y
EVALUACIÓN DE EQUIPOS DE AGITACIÓN Y MEZCLA DE LÍQUIDOS
NEWTONIANOS Y NO NEWTONIANOS DE INTERÉS AGROINDUSTRIAL
(MixBry versión 1.0)**

JAVIER GUSTAVO HERNÁNDEZ REINO

GRUPO DE INVESTIGACIÓN PADES

**LINEA DE INVESTIGACIÓN MODELACION Y SIMULACION DE
PROCESOS AGROINDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE SUCRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
SINCELEJO
2007**

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA LA SELECCIÓN Y
EVALUACIÓN DE EQUIPOS DE AGITACIÓN Y MEZCLA DE LÍQUIDOS
NEWTONIANOS Y NO NEWTONIANOS DE INTERÉS AGROINDUSTRIAL
(MixBry versión 1.0)**

JAVIER GUSTAVO HERNÁNDEZ REINO

Director

JAIRO SALCEDO

**Profesor del programa de ingeniería agroindustrial de la Universidad de
Sucre**

Codirector

RICARDO ANDRADE

**Profesor del programa de ingeniería de alimentos de la Universidad de
Córdoba**

GRUPO DE INVESTIGACIÓN PADES

**LINEA DE INVESTIGACIÓN MODELACION Y SIMULACION DE
PROCESOS AGOINDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE SUCRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
SINCELEJO
2007**

Nota de Aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Sincelejo,

*¡Cuán innumerables son tus obras, oh Dios!
Hiciste todas ellas con sabiduría; la tierra
está llena de tus beneficios.
Sal104: 24
La Biblia*

***“Únicamente los autores son responsables de la ideas
expuestas en el presente trabajo”***

A Dios que todo lo puede
A mi Madre Neila por
enseñarme a vivir
A Rosa por sus oraciones
A Betsy mi apoyo moral para
seguir

AGRADECIMIENTOS

El autor dirige sus agradecimientos a:

Jairo G. Salcedo, Ingeniero Químico. Msc. En Catálisis, por el seguimiento y aportes en la documentación y conocimientos de programación en LabVIEW 7.1 y asumir la dirección de este proyecto.

Ricardo D. Andrade, Ingeniero Químico. Esp. En Ciencia y Tecnología de Alimentos, por su importante apoyo en los conocimientos y el empeño en hacerlos comprender.

Rafael Corena, Ingeniero Agrícola. Esp. En Ingeniería de Software, por su apoyo y asesoría referentes a la programación orientada a objetos.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
2	ESTADO DEL ARTE.....	15
2.1	AGITACIÓN.	16
2.1.1	Modelo de flujo en tanques agitados.	19
2.2	FLUIDOS DESCRITOS POR LA LEY DE POTENCIA.	20
2.3	NECESIDADES DE POTENCIA EN AGITACIÓN.	21
2.4	OPERACIONES DE MEZCLADO.....	25
2.4.1	Mezclado de líquidos miscibles:	26
2.4.2	Suspensión de partículas sólidas:	27
2.4.3	Dispersiones Líquido-Líquido:	28
2.4.4	Dispersiones Gas-Líquido (Aireación):	29
2.4.5	Daños por cizalladura:	30
3	METODOLOGÍA	32
3.1	FASE DE CONCEPCIÓN O MODELADO	32
3.1.1	Diseño de la estructura de datos.	32
3.1.2	Diseño del algoritmo.	33
3.2	FASE DE IMPLEMENTACIÓN.	33
3.2.1	Codificación, ejecución y pruebas del programa.	33
3.3	FASE DE PRUEBA.....	35
4	RESULTADOS.....	36
4.1	ORGANIZACIÓN DE DATOS.....	36
4.2	DISEÑO LÓGICO DEL SISTEMA.....	38
4.3	DIAGRAMAS DE FLUJO DE LOS ALGORITMOS DE CÁLCULO.	39

4.4	MANUAL DEL USUARIO.	44
4.5	FASE DE PRUEBAS.	51
4.5.1	Ejemplo 9.1. (McCABE 2006). Consumo de potencia.	51
4.5.2	Ejemplo 3.4-l. (GEANKOPLIS, Christie J. 1999) Consumo de potencia en un agitador.	53
4.5.3	Ejemplo 9.3. (McCABE 2006). Mezcla de líquidos miscibles.	56
4.5.4	Ejemplo 9.4. (McCABE 2006). Suspensión de partículas sólidas.	57
4.5.5	Ejemplo 9.6. (McCabe). Dispersión de gases.	60
4.5.6	Ejemplo 7.3. (M. Doran. 1998). Condiciones de operación necesarias para causar daño por cizalla en turbulencias.	62
4.6	AYUDAS DEL SOFTWARE.....	65
4.7	CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE.....	67
5	CONCLUSIONES.....	68
6	RECOMENDACIONES.	69
	ANEXOS.....	70
	ANEXO A.....	71
	ANEXO B.....	76
	ANEXO C.....	79
	ANEXO D.....	80
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	84

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Geometría utilizada para definir los factores de forma según McCABE. 2003.	22
Figura 2. Mapa de navegación del sistema.....	38
Figura 3. Diagrama de flujo del consumo de potencia sin aireación.	40
Figura 4. Diagrama de flujo para el proceso de mezclado de líquidos miscibles.	41
Figura 5. Diagrama de flujo de suspensión de partículas sólidas.	42
Figura 6. Diagrama de flujo de agitación con aireación.	43
Figura 7. Diagrama de flujo de velocidad mínima de daños por cizalladura turbulenta.....	43
Figura 8. Panel de inicio.....	44
Figura 9. Panel de propiedades. Opción agitar un líquido.	45
Figura 10. Panel de propiedades. Opción agitar una mezcla de dos líquidos.	46
Figura 11. Cuadro de trabajo habilitado.	47
Figura 12. Opción calcular, para los datos de consumo de potencia.....	48
Figura 13. Módulo mezcla, opción mezclado de líquidos miscibles.....	49
Figura 14. Cuadro de diálogo para la opción de salir del programa.....	50

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modelo de datos en MixBry 1.0.....	36
Tabla 2. Requerimientos del sistema.....	37
Tabla 3. Números de potencia en función de LogRe (en régimen en transición), obtenidos a través de CurveExpert 1.3, sus gráficas están consignadas en el anexo D.....	37

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Prueba del MixBry 1.0, ejemplo 1.....	52
Ilustración 2. Prueba a) del ejemplo 2.....	55
Ilustración 3. Prueba b) del ejemplo 2.....	55
Ilustración 4. Prueba del ejemplo 3.....	57
Ilustración 5. Suspensión de partículas sólidas, prueba del ejemplo 4.	59
Ilustración 6. Aireación, prueba del ejemplo 5.	62
Ilustración 7. Daños por turbulencia, ejemplo 6.	63
Ilustración 8. Contenido de la ayudas para MixBry 1.0	65
Ilustración 9. Información general de MixBry 1.0.	66

RESUMEN

El desarrollo de herramientas que permitan analizar diferentes sistemas a los profesionales y estudiantes de las distintas ramas de la ingeniería, se ha constituido en una tendencia de gran trascendencia en las ciencias aplicadas, ya que permiten al usuario que tenga mayor relación con las variables que afectan un problema reduciendo el tiempo de resolución de las mismas. Dentro de estas herramientas utilizadas se encuentran los software aplicativos con propósito de evaluar los distintos estados de un sistema como el tratado en este trabajo en el que se elaboró un software para ayudar en el proceso tedioso de la selección y evaluación de equipos utilizados para las operaciones de agitación y mezclado dirigido a los productos e insumos utilizados en la agroindustria, como una forma de ayudar a disminuir el tiempo de cálculo y aumentar el grado de análisis de las variables y fenómenos que afectan tanto la calidad como el costo de operación requerido por tales equipos.

MixBry 1.0 es una alternativa con sello colombiano, desarrollada bajo la plataforma gráfica LabView 7.1, con el objetivo de brindar una alta fiabilidad que ayuda al usuario en el proceso de la selección de agitadores desde la perspectiva de mostrar cómo se afecta el consumo de energía y el tiempo que llevaría a cabo realizar mezclas de líquidos, al igual que permite dimensionar la geometría de los agitadores ajustándolos a los requerimientos de los diseñadores. Por otra parte, MixBry 1.0 consta de otros casos adicionales como son la consecución de la velocidad mínima de agitación para lograr una suspensión completa de sólidos, la velocidad límite de agitación para causar daños por cizalladura, lo que es muy importante en el diseño de biorreactores tipo tanque agitado, como también una carga adicional de las propiedades reológicas de algunos líquidos comunes de interés agroindustrial.

ABSTRACT

The development of tools that allow to analyze different systems to the professionals and students of the different branches of the engineering, has been constituted in a tendency of great transcendence in the applied sciences, since they allow to the user that has bigger relationship with the variables that affect a problem reducing the time of resolution of the same ones. Inside these used tools they are the software applied with purpose of evaluating the different states of a system like the treaty in this work in which a software was elaborated to help in the tedious process of the selection and evaluation of the logistics used for the operations of agitation and blended directed to the products and inputs used in the agroindustry, like a form of helping to diminish the time of calculation and the degree of analysis of the variables and phenomenons that affect as much the quality as the operation cost required by the same one to increase.

MixBry 1.0 are an alternative with Colombian stamp, developed under the graphic platform LabView 7.1, with the objective of a high reliability that gives help to the user in the process of the selection of impellers from the perspective of showing toasting how it is affected the energy consumption and the time that it would carry out to carry out mixtures of liquids, the same as it allows dimensional the geometry of the agitators adjusting them to the requirements of the designers. On the other hand, MixBry 1.0 consist of other additional cases as they are the attainment of the minimum speed of agitation to achieve a complete suspension of solids, the speed limit of agitation to cause damages for sharp efforts, what is very important in the design of bioreactors type upset tank, as well as an additional load of the properties rheological of some liquids common of agro business interest.

1 INTRODUCCIÓN

En el manejo de materiales en la agroindustria, los procesos de agitación y mezcla constituyen pasos preliminares para operaciones unitarias, por lo que su buen desempeño depende en gran medida de la manera como se lleven a cabo dichos procesos. En general, una buena mezcla puede depender (si el patrón de flujo es adecuado) de una buena agitación y éstos, a su vez, son el resultado de una buena selección de los equipos utilizados. Aunque normalmente suelen confundirse, los términos agitación y mezcla, la primera se refiere a un movimiento inducido a un material en forma específica, generalmente en flujo circulatorio, mientras la segunda hace referencia a la incorporación aleatoria entre sí de dos o más fases inicialmente separadas; es también muy común que ambos procesos se presenten (en el caso de líquidos) en recipientes cilíndricos, provistos de agitadores y otros accesorios, denominándosele al sistema tanques agitados.

El problema de diseñar tanques agitados radica en la complicación proveniente de la gran variedad de combinaciones posibles entre equipos utilizados, fluidos a procesar y demás accesorios que tienen efectos sobre las correlaciones utilizadas, teniendo en cuenta que aún existen fluidos cuyas propiedades reológicas no han sido debidamente estudiadas.

Para el ingeniero de procesos, pueden presentarse problemas en el momento de seleccionar equipos, dado que si algunos ofrecen buenos resultados en cuanto a calidad, sus costos pueden resultar injustificables para una empresa, mientras que otros equipos pueden ser muy baratos, pero con resultados contrarios. Sabiendo esto, el diseñador debe hacer los cálculos de consumo energético y compararlos con los costos y volumen de operación con tantos equipos como considere necesarios.

El desarrollo de una herramienta como ayuda para diseñar sistemas de tanques agitados con la que se puedan incluir variantes hipotéticas con tantas combinaciones de equipos como se quieran considerar, es factible y puede facilitar la tediosa labor del ingeniero en la toma de decisiones, si se logran implementar los procedimientos lógicos para el mismo efecto, haciendo que sus componentes permitan utilizar datos claves que correspondan al desempeño y comportamiento de distintos agitadores utilizados y que conlleven a la selección y/o evaluación de dichos equipos, que corresponde al objetivo final de este proyecto.

2 ESTADO DEL ARTE

Desde inicios de la revolución de la informática, se ha venido trabajando en la modelación computacional de los procesos industriales. Así en los últimos años se han popularizado las aplicaciones de simulación de procesos por computadora y numerosas aplicaciones para el tratamiento de procesos específicos de diversas industrias (petróleo, petroquímica, alimentos, papel, farmacéutica, etc.). Del mismo modo la amplia difusión de los paquetes comerciales de simuladores generales refleja esta tendencia. Sin embargo, la utilización de estas herramientas de simulación para tratar problemas de optimización ha sido la que más se ha demorado. Recién en la década de los 80 hay un esfuerzo continuo que permite la resolución de este tipo de problemas. Hasta ese momento sólo técnicas muy rudimentarias, a través de la resolución de gran número de simulaciones, habían permitido tratar problemas relativamente simples con un alto consumo de recursos computacionales (Scenna. J. N y Col. 1999, Pág. 583). Este campo aún tiene áreas que necesitan ser estudiadas como es el caso de la agitación y la mezcla, en las cuales el diseño de sus equipos depende en gran medida de la experiencia del diseñador; no obstante en el caso del escalamiento de tanques agitados se ha podido encontrar la existencia de simuladores como FLUENT 5 Y MixSim 2.0 (Marden. E, Bakker. A. 2003, Pág. 5), que son herramientas de simulación interactiva para escalar tanques agitados y registrar los patrones de flujo. Funcionan a través del sistema CFD (Computational Fluids Dynamic), producidos en EE.UU. y Brasil respectivamente. Existen muchos trabajos respecto a este proceso y su comportamiento en cuanto a las correlaciones de las variables implicadas en turbinas, pero respecto a trabajos realizados para evaluación y selección en la modelación computacional de equipos de agitación y mezcla, es muy escasa la información, o se encuentra en manos de multinacionales

dedicadas a proveer esta clase de equipos quienes a su vez mantienen el monopolio de los datos experimentales de sus diseños.

“La simulación por computadoras ha sido largamente usada en el diseño, optimización y análisis de performance de procesos continuos. A medida que esta tecnología se hizo madura, fue incorporada en herramientas comerciales de uso extendido. Sin embargo, para los procesos discontinuos el estado del arte es completamente diferente. Mientras que existe numerosa bibliografía atendiendo al problema de la simulación de etapas batch individuales, la simulación de procesos completos todavía se encuentra en un nivel de desarrollo mucho más incipiente. La principal dificultad radica en la complejidad que introducen las relaciones entre las etapas habida cuenta de las características tan particulares que presentan los procesos batch desde el punto de vista de los estados no estacionarios, discontinuidades del flujo de material, las distintas políticas de operación posibles, etc.” Enrique Salomone (Scenna. J. N y Col. 1999, Pág. 741).

2.1 AGITACIÓN.

El éxito de muchas operaciones en la industria depende de un buen proceso previo de agitación y la mezcla de fluidos. Aunque ambos procesos tienden a ser confundidos, éstos no son sinónimos pues, la agitación se refiere al movimiento inducido hacia un material de forma específica, normalmente en patrón circulatorio dentro de algún tipo de contenedor; mientras, la mezcla es una distribución aleatoria, dentro y a través una de otra, de dos o más fases inicialmente separadas. El término mezcla es aplicado a una variedad de operaciones que difieren ampliamente en el grado de homogeneidad del material mezclado (McCabe. 2003. Pág. 263).

Dependiendo de los propósitos de agitación existen varios objetivos:

- Mezclado de dos líquidos miscibles.
- Disolución de sólidos en líquidos.
- Dispersión de un gas en un líquido en burbujas pequeñas.
- Suspensión de partículas sólidas finas en un líquido.
- Agitación de un fluido para aumentar la transferencia de calor entre el recipiente calentado y el fluido.

Generalmente se hace la agitación de líquido en un tanque agitado cilíndrico cerrado o abierto. La altura del líquido debe equivaler al diámetro del tanque. Un motor debe impulsar al propulsor agitador, que está montado en un eje o rodete. Algunos tipos de agitadores utilizados según (McCabe. 2003. Pág. 264) son:

- **Agitador propulsor de tres aspas o hélice.** Es uno de los más conocidos, sobre todo de aspas de tipo marino, que parece una hélice de un motor para lanchas. El agitador puede tener alguna movilidad para ser introducido lateralmente en el tanque o estar montado en la pared de un tanque abierto, en posición desplazada del centro. Su velocidad de giro está entre 400 – 1750 rpm y son propios para líquidos de baja viscosidad. Son eficaces para tanques muy grandes.
- **Agitadores de paletas o canaleta.** Para velocidades de 20 – 200 rpm se emplean diversos tipos de agitadores de paletas. Se tienen sistemas de dos a cuatro paletas planas, cuyo diámetro mide de 60 – 80% del diámetro del tanque y su anchura está de 1/6 – 1/10 de su longitud. A bajas velocidades se consigue agitación suave en un recipiente sin deflectores. A velocidades más altas se usan deflectores para evitar la formación de remolinos y no permite un buen mezclado.

- **Agitadores de turbina.** Cuando se procesan líquidos con amplia diversidad de viscosidades, se usan turbinas semejantes a un agitador de paletas múltiples con aspas más cortas. El diámetro de una turbina suele ser de 30 – 50% del diámetro del tanque. Normalmente las turbinas tienen cuatro o seis aspas. Las turbinas con aspas planas producen un flujo radial. Para dispersar un gas en un líquido, el gas puede hacerse penetrar justo por debajo del propulsor de la turbina en su eje; de esa manera las paletas dispersan el gas en muchas burbujas finas. Con aspas a 45°, se imparte cierto flujo axial combinado con radial, siendo útil para sólidos en suspensión por el efecto de las corrientes.

Estos tres primeros tipos de agitadores son llamados *rodéles* y se estima que resuelven el 95% de los problemas de agitación según McCabe, pero se halla de acuerdo a Geankoplis. 1999, Pág. 162, en la utilización de los siguientes agitadores:

- **Agitadores de ancla y cinta helicoidal.** Son agitadores de gran tamaño utilizados para trabajar con fluidos muy viscosos entre los 100 y 1000.000 cP. Por su tamaño ocupan casi la totalidad del tanque, teniendo la particularidad de rascar las paredes del mismo, caso que es muy común con los de ancla, estos tipos de agitadores trabajan a bajas velocidades pero proporcionan diferenciales pequeños de turbulencia en diferentes puntos del tanque.
- **Agitadores de turbina CD-6, y de alta eficiencia HE-3 y A310.** Los agitadores de turbina como CD-6 son utilizados en procesos específicos dentro de la agitación, los estudios referente a sus correlaciones son escasos excepto por su curva de potencia, se estima que puede dar resultados satisfactorios en la dispersión gaseosa, en el caso de los agitadores HE-3 y A310 son manejados preferiblemente a rangos altos de

velocidad en comparación con los rodetes, en cuyo caso son eficientes dado su bajo consumo de potencia, pero su mejor desempeño lo brindan con líquidos de baja viscosidad.

2.1.1 Modelo de flujo en tanques agitados.

El tipo de flujo es dependiente del tipo de rodete, de las características del fluido y del tamaño y proporción del tanque, placas deflectoras y agitador.

La velocidad del fluido consta de tres componentes que son: flujo radial, flujo axial y tangencial o rotacional (Brodkey. R. 1988, Pág. 369; McCabe. Pág. 268). Los dos primeros son ideales para una buena mezcla. El primero es perpendicular y el segundo paralelo al eje del rodete.

En cuanto al flujo tangencial, se dice que es perjudicial por cuanto es un flujo descrito por la trayectoria del rodete, generando aceleración centrípeta que causa el efecto contrario a la mezcla, o sea, segregación de materiales densos hacia las paredes.

El flujo circulatorio suele prevenirse de tres formas:

- En tanques pequeños, el eje del rodete se inclina respecto al plano longitudinal del tanque.
- En tanques de mayor tamaño, el agitador puede montarse en sentido horizontal por un lado del tanque.
- En tanques grandes (de uso industrial), se utilizan placas deflectoras con agitadores en sentido vertical.

2.2 FLUIDOS DESCRITOS POR LA LEY DE POTENCIA.

Los fluidos no newtonianos pueden dividirse (Geankoplis. 1999. Pág. 174) en dos categorías principales con base en su comportamiento de *esfuerzo cortante/ velocidad cortante*, los *independientes del tiempo* y los *dependientes del tiempo*, además de esta descripción también existen fluidos no newtonianos con características elásticas que están en función de tiempo y se denominan *viscoelásticos*, pero los más abundantes de los no newtonianos en la naturaleza son los independientes del tiempo. Estos fluidos pueden subdividirse a su vez en tres grupos que son los *plásticos de Bingham*, los *pseudoplásticos* y los *dilatantes*, estos fluidos son descritos mediante la ley exponencial o ley de potencia que corresponde a la ecuación 1:

$$\mu_a = K' \left[\frac{dv}{dy} \right]_{prom}^{n'-1} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

μ_a : Es la viscosidad aparente en Pa.s.

$\left[\frac{dv}{dy} \right]_{prom}$: Es la velocidad promedio de corte en 1/s.

K' : Es el índice de consistencia en $Pa.s^{n'}$.

n' : Es el índice de flujo adimensional.

El carácter del tipo de fluido está dado por los parámetros K' y n' donde el valor de n' es el más influyente de los dos. De este modo para cada fluido se puede decir que:

- Los plásticos de Bingham son los más parecidos a los fluidos newtonianos diferenciándose solo en que a los primeros se les debe

suministrar cierto exceso de esfuerzo cortante para fluir, pero su valor de $n' = 1$ al igual que en los newtonianos.

- Los pseudoplásticos son el grupo que encierra a la mayoría de los no newtonianos e incluyen las soluciones de polímeros, grasas, suspensiones de almidón, la mayonesa, ciertos fluidos biológicos, suspensiones de detergentes, los medios de dispersión de algunos productos farmacéuticos y las pinturas. En este tipo de fluidos el valor del índice de flujo es $n' < 1$.
- Los dilatantes son mucho menos comunes que los pseudoplásticos, su comportamiento de flujo muestra un aumento de la viscosidad aparente al elevar la velocidad de corte. A este grupo pertenecen las soluciones de harina de maíz y azúcar, arena de playa húmeda, almidón en agua, silicato de potasio en agua, en general varias soluciones que contengan concentraciones elevadas de polvo en agua. El valor del índice de flujo en este tipo de fluido de $n' > 1$.

El comportamiento de estos fluidos así como algunos parámetros reológicos de interés están representados en el anexo A.

2.3 NECESIDADES DE POTENCIA EN AGITACIÓN.

Existen convenciones en las proporciones estándar para diseñar tanques agitados (figura 1). En general, se utiliza un agitador de turbina cuyas proporciones típicas son:

$$\left[\frac{Da}{Dt} = \frac{1}{3} \right] \left[\frac{H}{Dt} = 1 \right] \left[\frac{J}{Dt} = \frac{1}{12} \right] \left[\frac{E}{Da} = 1 \right] \left[\frac{W}{Da} = \frac{1}{5} \right] \left[\frac{L}{Da} = \frac{1}{4} \right]$$

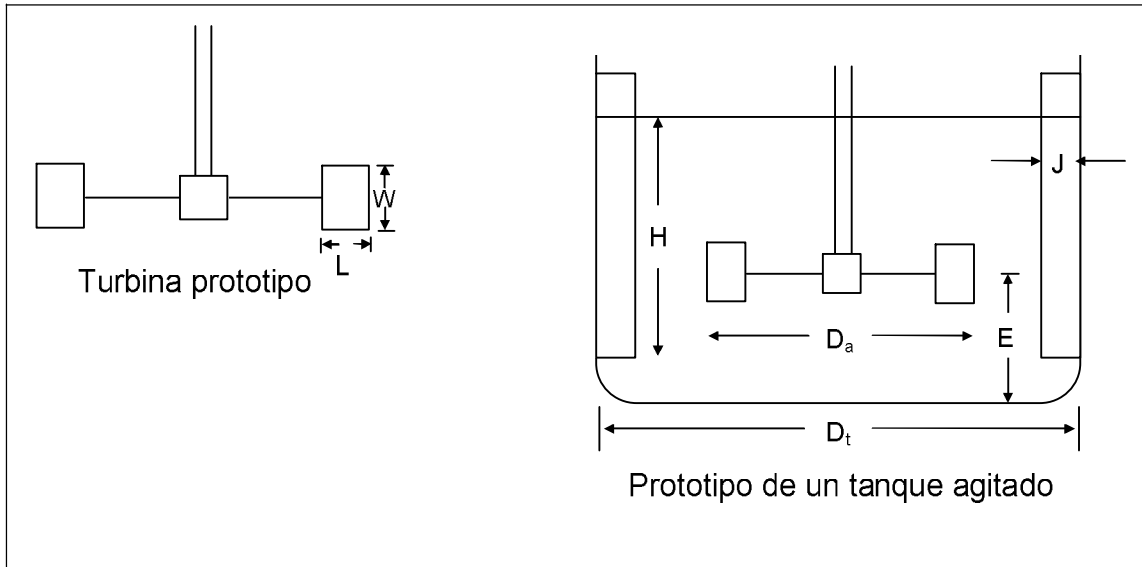


Figura 1. Geometría utilizada para definir los factores de forma según McCabe. 2003.

Para hacer cálculos que conlleven al consumo de potencia, se tienen en cuenta (según McCabe. 2003. Pág. 273-281) el siguiente modelo, en el cual coincide con otros autores (Geankoplis. 1999. pág. 164-165, Scragg. 2000. pág. 288 y M, Doran. 1998. pág. 155).

Definiendo las variables del proceso:

- Viscosidad (μ) y densidad (ρ) del material.
- Velocidad de giro (N), aceleración de gravedad (g).
- Las medidas lineales del tanque son usadas como factores adimensionales llamadas “factores de forma”, los cuales son las proporciones típicas y se definen como $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$.

Así: El número de potencia $P_o = f (Re, Fr, S_1, S_2, S_3, \dots, S_n)$

$$S_1 = \frac{Da}{Dt}, S_2 = \frac{E}{Da}, S_3 = \frac{L}{Da}, S_4 = \frac{W}{Da}, S_5 = \frac{J}{Dt}, S_6 = \frac{H}{Dt}$$

Las variables se aglomeran en grupos adimensionales para obtener las correlaciones que describan el sistema así:

- El flujo se caracteriza por el número de Reynolds:

$$Re = \frac{Da^2 N \rho}{\mu} \quad \text{Ecuación 2}$$

El flujo es turbulento para $Re > 10^4$, mientras que es laminar para $Re < 100$, si el líquido es no Newtoniano y sigue la ley de potencia, Re se describe por la viscosidad aparente, representándose así:

$$Re_n = \frac{N Da^2 \rho}{K' (d\mu / c' y)_{med}^{n'-1}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde K' y n' son constantes típicas del fluido (ver anexo A)

- Teniendo en cuenta efectos gravitacionales usamos el número de Froude:

$$Fr = \frac{N^2 Da}{g} \quad \text{Ecuación 4}$$

- Para relacionar la energía requerida por el agitador se utiliza el número de potencia:

$$Np = \frac{P}{N^3 Da^5 \rho} \quad \text{Ecuación 5}$$

- Np se ha relacionado con Re para varios tipos de agitadores. En la región laminar $Re < 100$.

$$Np = \frac{K_L}{Re}$$

$$P = K_L N^2 Da^3 \mu \quad \text{Ecuación 6}$$

En la región turbulenta $Re > 10^4$, no influye μ

$$Np = K_T = f(S_1, S_2, \dots, S_n),$$

$$P = K_1 N^3 Da^5 \rho \quad \text{Ecuación 7}$$

Los valores de K_r y K_L están consignados en el anexo A.

La relación general de potencia será:

$$P = Np N^3 Da^5 \rho \quad \text{Ecuación 8}$$

Los números de potencia para cada agitador se obtuvieron de las correlaciones de potencia consignadas en el anexo B.

- Si el fluido es un pseudoplástico entonces a partir de la ecuación (2):
 $(d\mu / dy) = kn^* N$, donde kn depende del tipo de agitador pueden encontrarse sus valores para distintos agitadores en el anexo C.

$$Re, n = \frac{N_2^{2-n'} Da^2 \rho}{K' k^{n'-1}} \quad \text{Ecuación 9}$$

- Haciendo un análisis (por parte del autor del trabajo), al ser newtoniano $\mu = K'$ y la ecuación 2 se convierte en:

$$Re = \frac{N_1 Da^2 \rho}{K'} \quad \text{Ecuación 10}$$

Igualando (9) y (10) se obtiene:

$$N_1 = \frac{N_2^{2-n'}}{k^{n'-1}} \quad \text{Ecuación 11}$$

Luego al comparar las potencias requeridas en ambos casos en que se utilicen los dos tipos de líquido, la potencia requerida con los no newtonianos que siguen la "*ley de potencia*", depende entonces de la potencia requerida con newtonianos y recibe un mayor efecto dado por el gradiente promedio de velocidad cortante:

$$P_n = P[knN_2]^{\frac{1}{n-1}} \quad \text{Ecuación 12}$$

Así se pueden obtener datos para fluidos no newtonianos que se rigen por la "ley de potencia".

2.4 OPERACIONES DE MEZCLADO.

En cuanto a las operaciones de mezclado, se debe tener en cuenta la descripción del proceso, como son los casos en que se mezclan líquidos miscibles, suspensión de partículas sólidas u operaciones de dispersión, ya sea líquido – líquido o gas – líquido, observando otras correlaciones que describen el comportamiento de cada caso de mezclado.

Al mezclar varios líquidos miscibles la viscosidad resultante (según M.C. Valiente. 1993, Pág. 218) está dada por la ecuación siguiente:

$$\mu = 10^{(x_1 \text{Log}\mu_1 + x_2 \text{Log}\mu_2 + \dots + x_n \text{Log}\mu_n)} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

μ : Corresponde a la viscosidad de la mezcla.

$\mu_{(1,2,\dots,n)}$: Son las distintas viscosidades de los líquidos mezclados.

$x_{(1,2,\dots,n)}$: Son las fracciones de cada líquido en la mezcla.

2.4.1 Mezclado de líquidos miscibles:

Este caso de mezclado muestra varias ecuaciones que relacionan un factor adimensional denominado factor de tiempo de mezcla (Ft) que está correlacionado con el número de flujo que describe el flujo que bombea el agitador y en los casos en que no se utilizan placas deflectoras con el número de Froude (Fr).

Basado en la experimentación se considera que una mezcla de líquidos miscibles es satisfactoria cuando al tomarse muestras se observa una mezcla esencialmente completa (99%) según McCabe. Pág. 282. De aquí que tome importancia el valor del tiempo de mezcla (t_T), cuyo parámetro es aplicable en la caracterización del flujo en reactores y fermentadores de tanque agitado.

El tiempo de mezcla está relacionado de forma directa con los ciclos de circulación del contenido del tanque (de 4 ciclos según M. Doran. Pág. 154; o 5 ciclos según McCabe. Pág. 282). Las correlaciones y ecuaciones varían según el equipo de agitador.

El factor de tiempo de mezcla se define como sigue:

$$Ft = N \times t_T \quad \text{Ecuación 14}$$

Así, si se desea saber el tiempo total de mezclado se utiliza la siguiente correlación:

$$t_T = \left[\frac{5\pi}{4} \right] \left[\frac{1}{NQ} \right] \left[\frac{1}{N} \right] \left[\frac{Da}{Dt} \right]^{-3} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde NQ: es el número adimensional de flujo para cada tipo de agitador (ver anexo C).

De este modo pueden obtenerse los tiempos de mezclado para distintos tipos de agitadores, y asimismo la energía consumida en el proceso, sabiendo que:

$$E = P * t_T \quad \text{Ecuación 16}$$

2.4.2 Suspensión de partículas sólidas:

Por más de 40 años se ha trabajado este proceso por medio del paradigma de que una suspensión se considera en estado “*completa*” cuando una partícula utilizada para modelar el experimento no se mantiene en el fondo del tanque durante un tiempo no mayor de 2 segundos, definido entre los grados de suspensión descritos por (McCabe. Pág. 290 y M. Doran. Pág. 168). Este grado de suspensión fue resuelto matemáticamente por Zwietering, resultando la correlación adimensional que lleva su nombre:

$$Nc * Da^{0.85} = S * \nu^{0.1} * Dp^{0.2} * \left[g \frac{\Delta\rho}{\rho} \right]^{0.45} * B^{0.13} \quad \text{Ecuación 17}$$

En donde:

Nc : Es la velocidad mínima del agitador para mantener sólidos en suspensión en Rev. /s.

S : Es una constante o factor de forma definido para cada tipo de agitador se encuentran consignados en el anexo C.

ν : Viscosidad cinemática del líquido, en m^2 /s .

Dp : Diámetro estimado de partícula, en m.

g : Aceleración de la gravedad.

$\Delta\rho$: Diferencia de densidades entre la partícula y el líquido.

ρ : Densidad del líquido en Kg. /m³ .

D_a : Diámetro del agitador en m.

B : % p/p de sólidos en la suspensión.

Aunque el paradigma en que se basa este modelo, ha recibido críticas por ser insuficiente para definir la calidad adecuada de una suspensión de sólidos, suele ser útil en fermentadores en los que se debe evitar que las células, o en su defecto enzimas encapsuladas, se depositen en el fondo de los tanques de fermentación a fin de lograr una transferencia de materia satisfactoria y evitar la formación de flóculos en el fondo y paredes del tanque. Existen otros paradigmas que prometen ser efectivos para cualificar y predecir la calidad de dichas suspensiones, pero necesitan ser confrontadas en cada caso con datos experimentales, sobre todo si se trata de escalar tanques de mezcla, como es el sistema CFD (Computacional Fluid Dynamic, Bakker y Col. 2000. pág. 6) o sistema de mecánica de fluidos por computador, que resulta útil si se toman como partida los datos arrojados por la correlación de Zwietering.

Los datos obtenidos de velocidad mínima del agitador, se pueden relacionar con las ecuaciones de consumo de potencia descritas en el aparte **2.4**.

2.4.3 Dispersiones Líquido-Líquido:

Existen varios equipos utilizados para dispersar un líquido inmiscible en otro. Los tanques agitados pueden producir gotas dispersas del tamaño de 0.05-1.0 mm. Teniendo así áreas superficiales de gran tamaño, pero que no son estables, ya que las gotas sedimentarían o se suspenderían sobre la que fuera la fase continua, y en ausencia de agitación presentarían coalescencia. Las emulsiones de gotas pequeñas que son realmente estables pueden formarse en otro tipo de equipos, como los molinos coloidales entre otros que

generan suficiente cizalladura. Dada la baja aplicabilidad de esta operación en los equipos tipo tanque agitado (McCabe. 2003, Pág.295), no se incluirá en el software este caso de uso.

2.4.4 Dispersiones Gas-Líquido (Aireación):

Al inyectar gas en los líquidos que se agitan en un tanque de mezclado suele haber reducción de la potencia requerida. Las burbujas de gas dan el efecto de reducir la densidad del fluido que se maneja, aunque este efecto sobre el consumo de potencia no sea muy determinante en el consumo energético como lo describe la ecuación 8. No obstante la presencia de burbujas deja ver sus efectos sobre el sistema hidrodinámico del fluido alrededor del agitador. Las grandes burbujas que se mueven desde la parte baja del tanque y que buscan la superficie del mismo, disminuyen tanto la resistencia al esfuerzo de corte como también el coeficiente de rozamiento del rodete.

La comprensión total del fenómeno de los cambios en la mecánica de flujo de los líquidos aireados es difícil, pero puede deducirse que el consumo de potencia depende en gran medida de la formación de burbujas; y ya que el proceso se realiza por lotes y su comportamiento es aleatorio la relación en el consumo de potencia no es uniforme en lo esencial. A pesar de esto se ha podido expresar matemáticamente la relación de potencia sin aireación (P_o) y con aireación (P_g), en función de las condiciones de proceso (M. Doran. Pág. 159), a través de la ecuación:

$$\frac{P_g}{P_o} = 0.01 * \left[\frac{N * V}{F_g} \right]^{0.25} \left[\frac{g * W * V^{2/3}}{N^2 * Da^4} \right]^{0.20} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

F_g es el caudal volumétrico del gas.

N : velocidad de agitación.

V : volumen de líquido.

D_a : Diámetro del agitador.

g : Aceleración de la gravedad.

W : Anchura de la pala del rodete.

Los valores experimentales tienen sobre esta ecuación una desviación media del 12% aproximadamente. Dependiendo del flujo de gas es posible llevar la relación P_g/P_o hasta un 50%.

2.4.5 Daños por cizalladura:

La mezcla en los biorreactores debe proporcionar las condiciones de cizalla necesaria para dispersar las burbujas, gotas y flóculos de células. Actualmente no se comprenden en su totalidad los efectos de la cizalla en las células pero puede decirse que existen grupos de células que son sensibles a esta y se pueden destacar los mecanismos varios que son causantes del daño celular:

- La interacción entre las células y los remolinos turbulentos.
- Las colisiones célula-célula, célula-rodete y célula-superficies fijas del tanque.
- La formación de fuerzas de cizalla en la capa límite y estelas cercanas a los objetos del biorreactor y especialmente del rodete.
- La formación de fuerzas de cizalla en la ascensión de las burbujas a través del líquido.
- El estallido de las burbujas en la superficie del líquido.

Las condiciones de operación necesarias para causar daño por cizalladura en turbulencia, se puede evitar teniendo en cuenta la escala de Kolmogorov por encima de $2/3-1/2$ de los diámetros de partículas suspendidas (M. Doran. Pág. 164-166), luego la velocidad necesaria para causar este daño la encontramos por la correlación:

$$Nm = \sqrt[3]{\frac{Pm}{K_T * \rho m * Da^5}} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

Nm : Es la velocidad mínima de cizalladura.

Pm : Es la potencia requerida para crear daños por cizalladura.

ρm : Es la densidad de la solución microportadora.

Luego:

$$Pm = \frac{v^3}{\lambda^4} * \rho * Da^3 \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

v : Es la viscosidad cinemática del líquido de la solución microportadora.

λ : Es el tamaño de los remolinos causantes de cizalla de 2/3 del diámetro de la célula o partícula en suspensión.

3 METODOLOGÍA

Para resolver problemas con procesadores de datos debe hacerse la idealización de un programa que dé las instrucciones acerca de cómo manipular los datos, así mismo el programa tiene que ser ejecutado en el computador. El proceso de desarrollo de un programa es netamente creativo y en reiteradas ocasiones es iterativo, sin embargo pueden contemplarse paradigmas de trabajo en fases y pasos, que en general, son necesarios en la tarea de programar, de manera que se abarcó el problema a resolver de la siguiente forma:

3.1 FASE DE CONCEPCIÓN O MODELADO

En esta fase se necesitó que el problema fuera abordado con claridad, para definir tanto los requerimientos del sistema, como los resultados o alcances que se querían lograr. De modo que se realizó una amplia documentación y un análisis funcional del área de la agitación y mezcla de líquidos, para definir los casos de uso y sus actores. Se buscaron básicamente dos propósitos esenciales para modelar el sistema: el primero consistió en definir como organizar los datos de la mejor manera posible y el segundo como desarrollar los algoritmos de solución para los efectos que permitieran al usuario la selección y evaluación de los equipos de agitación y mezcla de líquidos, definiendo en seguida cuales los datos de entrada, los de salida y qué procedimientos realizaría el sistema.

3.1.1 Diseño de la estructura de datos.

De acuerdo con los requerimientos del sistema, el siguiente paso consistió en obtener un esquema de datos que estuviera acorde con lo que se quería lograr en el diseño del software y el estudio se basó en el método descrito por (De. Miguel y Col. 2000. pág. 298-301) que describiría si el sistema

tendría relaciones relevantes entre las entidades que interactuaran en el mismo a fin de obtener un mapa relacional si así lo ameritaba el problema. Para la traslación de gráficas a funciones que permitieran al programa hacer los cálculos, fue necesario utilizar el software CurveExpert 1.3 como herramienta de trabajo.

3.1.2 Diseño del algoritmo.

Los algoritmos son un método para la resolución de problemas paso a paso, bien definidos, precisos y finitos, en que se busca la forma en que el programa realizará las tareas deseadas.

Para el diseño lógico se utilizó inicialmente el método de secuencia que permite llevar por pasos al resultado deseado en cascada, utilizando como herramienta los “diagramas de flujo” (González, H. 2001. pág. 77). De manera transversal este se fue verificando con el fin de afinar las propiedades deseables y eliminar las indeseables, comparándose con los modelos matemáticos que describen el proceso de agitación y mezcla de líquidos.

3.2 FASE DE IMPLEMENTACIÓN.

3.2.1 Codificación, ejecución y pruebas del programa.

Construido el algoritmo y habiéndose escogido el lenguaje de programación de LabView 7.1 (Laboratory Virtual Engineering workbench), se procedió con la codificación del programa adoptando un estilo de programación estructurada a través del desarrollo de subrutinas que facilitarían las correcciones al descubrirse errores en el sistema planteado. La selección de LabView 7.1 como lenguaje de programación se realizó por las siguientes características (Trejo. R. 1997. pág. 6).

- Facilidad de manejo, debido a que está basado en un nuevo sistema de programación gráfica, llamada lenguaje G.
 - Es un programa enfocado hacia la instrumentación virtual, por lo que cuenta con numerosas herramientas de presentación, en gráficas, botones, indicadores y controles, los cuales son muy esquemáticos y de gran elegancia. Estos serían complicados de realizar en bases como c++ donde el tiempo para lograr el mismo efecto sería muchas veces mayor.
 - Es un programa de mucho poder donde se cuentan con librerías especializadas para manejos de DAQ, Redes, Comunicaciones, Análisis Estadístico, Comunicación con Bases de Datos (Útil para una automatización de una empresa a nivel total).
 - Con este las horas de desarrollo de una aplicación por ingeniero, se reducen a un nivel mínimo.
 - Como se programa creando subrutinas en módulos de bloques, se pueden usar otros bloques creados anteriormente como aplicaciones por otras personas.
-
- **Diseño del sistema.** Se diseñaron los pantallazos que son accesorios del sistema y que facilitan la interacción entre éste y el usuario. Para el software se realizó un manual del usuario en un button denominado “ayudas” a través del editor de ayudas “Shalom Help Maker 0.5.2”.
 - **Compilación y ejecución.** Con la ayuda de un programa editor, el software se llevó a un archivo de programa al ser introducido en la memoria y posteriormente guardado en un disco, no sería necesario repetir el proceso ya que LabView 7.1 posee un menú de lista de errores que permite que sean corregidos de manera inmediata pues pueden ser ejecutados de manera simultánea. A fin de poder ejecutarse desde el

sistema operativo, para probar entonces la salida de resultados del programa.

- **Verificación y validación del sistema.** Es una prueba de escritorio introduciendo datos hipotéticos en el sistema o programa, con el fin de observar errores en el software, este proceso se realizó paso a paso de manera transversal para disminuir probabilidades de errores demasiado complicados de determinar. Los datos de prueba que se ingresaron al sistema fueron tanto en condiciones normales como extremas para observar limitaciones que permitan detectar errores de sintaxis, ejecución o lógicos, con el fin de corregirlos.

3.3 FASE DE PRUEBA.

Al carecer de equipos de laboratorio que permitieran validar los modelos descritos en la bibliografía, las pruebas realizadas consistieron en corridas de escritorio con la guía de ejercicios resueltos en la literatura consignada y se midió la variación de los datos arrojados por el software con respecto a los obtenidos teóricamente.

4 RESULTADOS.

4.1 ORGANIZACIÓN DE DATOS.

En esta fase del proyecto se llegó al supuesto de que los datos manejados se relacionarían solo si el programa los necesitaba para realizar los cálculos de simulación del proceso de selección y evaluación de equipos de agitación y mezcla, tomándose como entidades reales las propiedades del fluido y las constantes y funciones propias del agitador de forma que se definieron el modelo de datos en la tabla 1, los requisitos del sistema en la tabla 2 y las funciones de las correlaciones de potencia obtenidas en la tabla 3.

Tabla 1. Modelo de datos en MixBry 1.0.

Entidad	Atributos
Propiedades del Fluido	- Viscosidad Aparente en Pa.s, definida por la ley de potencia: $\mu = K' \gamma^{n'-1}$, donde K' y n' son el índice de consistencia en $Pa.s^{n'}$ y el índice de flujo adimensional respectivamente, convirtiéndose en subatributos. - Densidad del fluido (ρ) en Kg. /m³. - Temperatura (T) en °C
Propiedades del Agitador	- Función de Numero de potencia en régimen en transición $Np=f(Re)$. - Numero de potencia en régimen laminar/Numero de Reynolds (Kl). - Numero de potencia en régimen turbulento (Kt). - Factor de forma para suspensión de partículas sólidas (S). - Constante de variación de la velocidad de corte para la ley de potencia (Kn). - Factor de tiempo de mezcla en función del número de Reynolds $Ft=f(Re)$ - Numero de flujo.

Tabla 2. Requerimientos del sistema.

Datos de entrada	Procedimientos	Medios de obtención de la información
- Factores de forma: Da/Dt y W/Da. - Propiedades de los líquidos ✓ Viscosidad ✓ Densidad ✓ Temperatura - Tipo de agitador a utilizar - Velocidad de agitación - Diámetro del agitador - Modelo de comportamiento del agitador	- Simulación del proceso de agitación. - Traslación del sistema a los casos de uso comunes como son el mezclado de líquidos miscibles, la suspensión de partículas sólidas y la aireación, para llevarlos a las condiciones favorables de proceso.	Consultas a: libros, asesorías de profesionales y expertos, revistas y trabajos similares en la red o en medio magnético.

Tabla 3. Números de potencia en función de $\log Re$ (en régimen en transición), obtenidos a través de CurveExpert 1.3, sus gráficas están consignadas en el anexo D.

AGITADOR	FUNCIÓN	PARAMETROS
Turbina Rushton	$Np = a + bX + cX^2 + dX^3 + eX^4$ $X = \log Re$	$a = 12.380783$ $b = -5.0669016$ $c = -1.4211001$ $d = 1.2672922$ $e = -0.17372261$
Turbina de palas inclinadas de 45°	$Np = a + bX + cX^2 + dX^3$ $X = \log Re$	$a = 14.784119$ $b = -12.05836$ $c = 3.5770693$ $d = -0.35154633$
Impulsor HE-3	$Np = ab^X X^c$ $X = \log Re$	$a = 2.2039986$ $b = 2.0429901$ $c = -3.7222151$
Hélice paso cuadrado	$Np = (a + bX^c)^{-1}$ $X = \log Re$	$a = 0.075692471$ $b = 0.32435195$ $c = 1.5707099$
Cinta helicoidal paso cuadrado	$Np = (a + bX^c)^{-1}$ $X = \log Re$	$a = 0.0064906126$ $b = 0.0035094228$ $c = 4.747103$
Ancla o áncora	$Np = ab^X X^c$ $X = \log Re$	$a = 78.519911$ $b = 0.50919777$ $c = -1.6292173$
Canalete o agitador de dos palas	$Np = a + bX + cX^2 + dX^3 + eX^4$ $X = \log Re$	$a = 10.931812$ $b = -12.174852$ $c = 5.8917567$ $d = -1.2436819$ $e = 0.098001899$

4.2 DISEÑO LÓGICO DEL SISTEMA.

Para el sistema MixBry 1.0 se desarrolló el siguiente mapa de navegación que corresponde al modo en que el usuario se moverá en el manejo del software lo que a su vez contribuirá a enriquecer la modularidad del sistema.

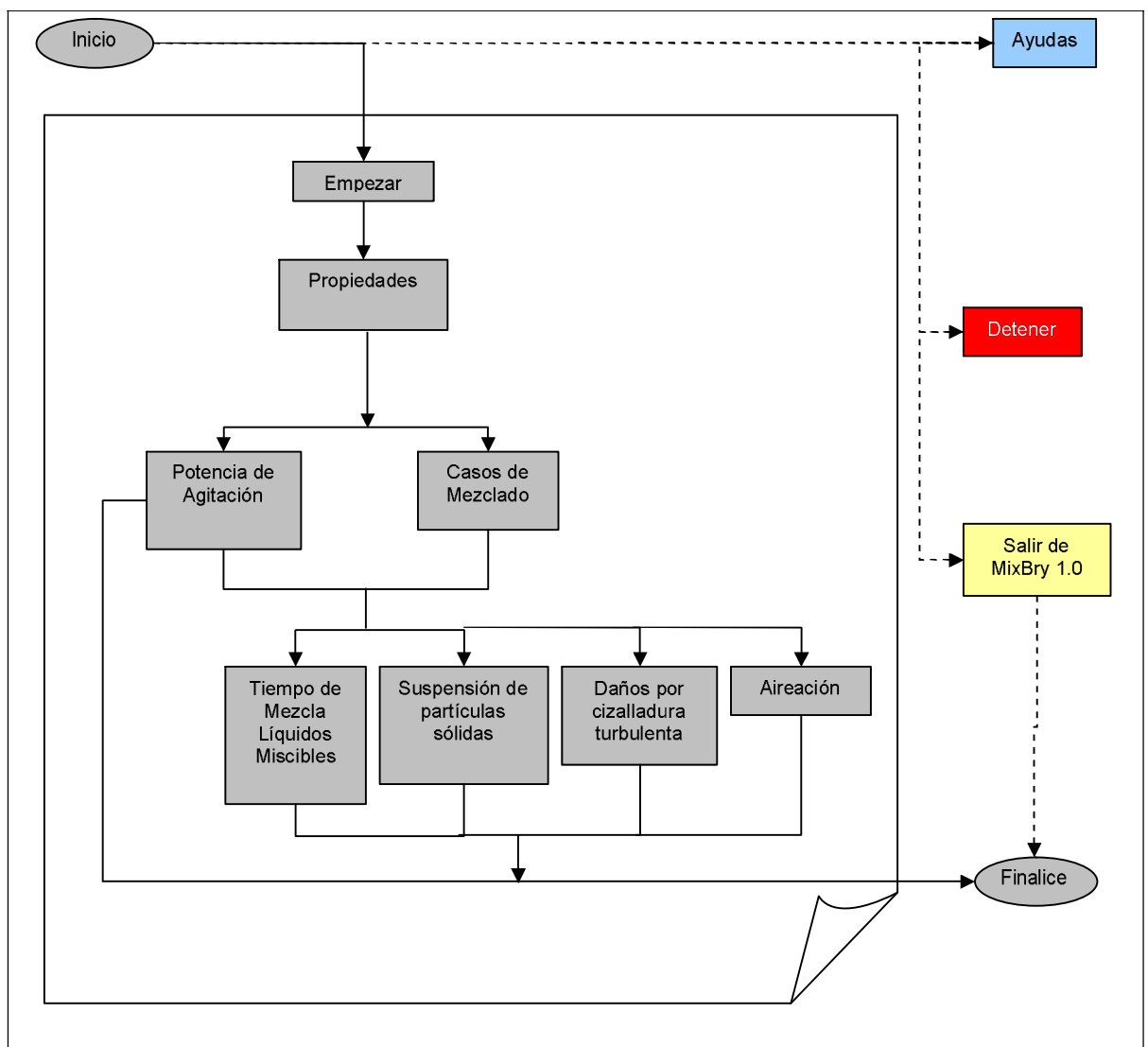


Figura 2. Mapa de navegación del sistema.

4.3 DIAGRAMAS DE FLUJO DE LOS ALGORITMOS DE CÁLCULO.

Durante el desarrollo de estos algoritmos fue necesario, el estudio reiterado de los procedimientos de cálculo y un estudio comparativo y exhaustivo de la teoría consignada en relación con el procedimiento de cálculo utilizado en cada caso y el uso de métodos numéricos que redujeran al máximo las iteraciones complicadas que llevaran al programa a errores en tiempo de ejecución; también se desarrollaron subrutinas que facilitaran esta tarea en combinación con la lógica del sistema, así que se adoptó una programación estructurada para poder discriminar con mayor facilidad los errores que se fueran presentando en el proceso o en su defecto hacer modificaciones convenientes.

Una vez creados los algoritmos se procedió a la parte de trabajo en el computador, pero en este nivel el papel del trabajo consistió en probar mediante las respectivas pruebas de escritorio el desempeño de los mismos, corrigiendo en cada paso lo que en orden no fuera necesario programar, las réplicas de ordenes que generaran conflicto, los errores en la lógica del sistema y observaciones de errores en tiempo de ejecución como ya se ilustró en el párrafo anterior.

Los diagramas de flujo que se desarrollaron, están esquematizados en la figura 3 como los cálculos de consumo de potencia flexible a agitación con o sin mezcla, la figura 4 muestra el diagrama de flujo para el cálculo del tiempo de mezclado de líquidos miscibles, la figura 5 contiene el diagrama de flujo para el cálculo de la velocidad mínima de suspensión de partículas sólidas, la figura 6 lleva al cálculo de la potencia consumida con aireación y la figura 7 resuelve la velocidad mínima de daños por turbulencia.

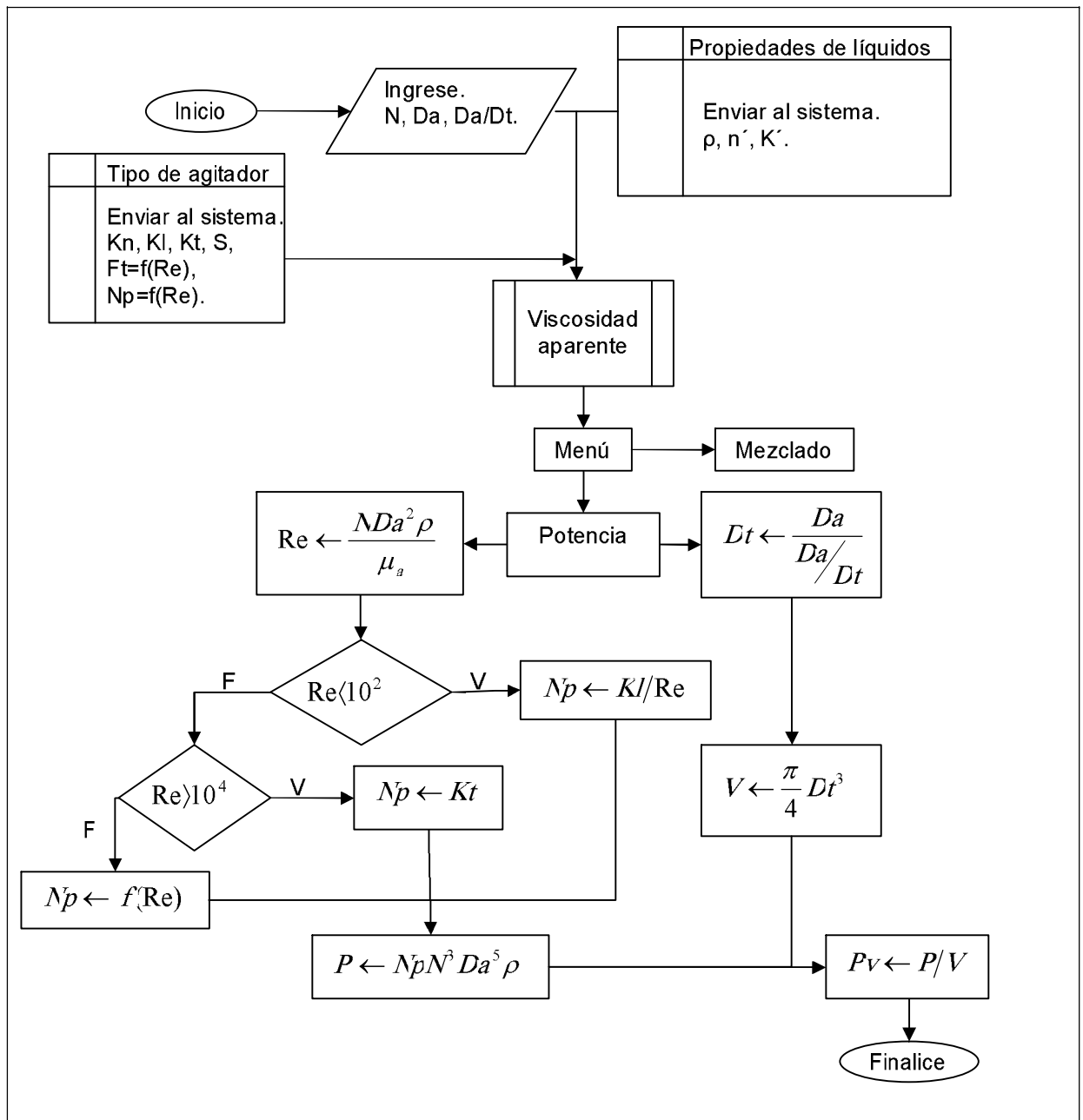


Figura 3. Diagrama de flujo del consumo de potencia sin aireación.

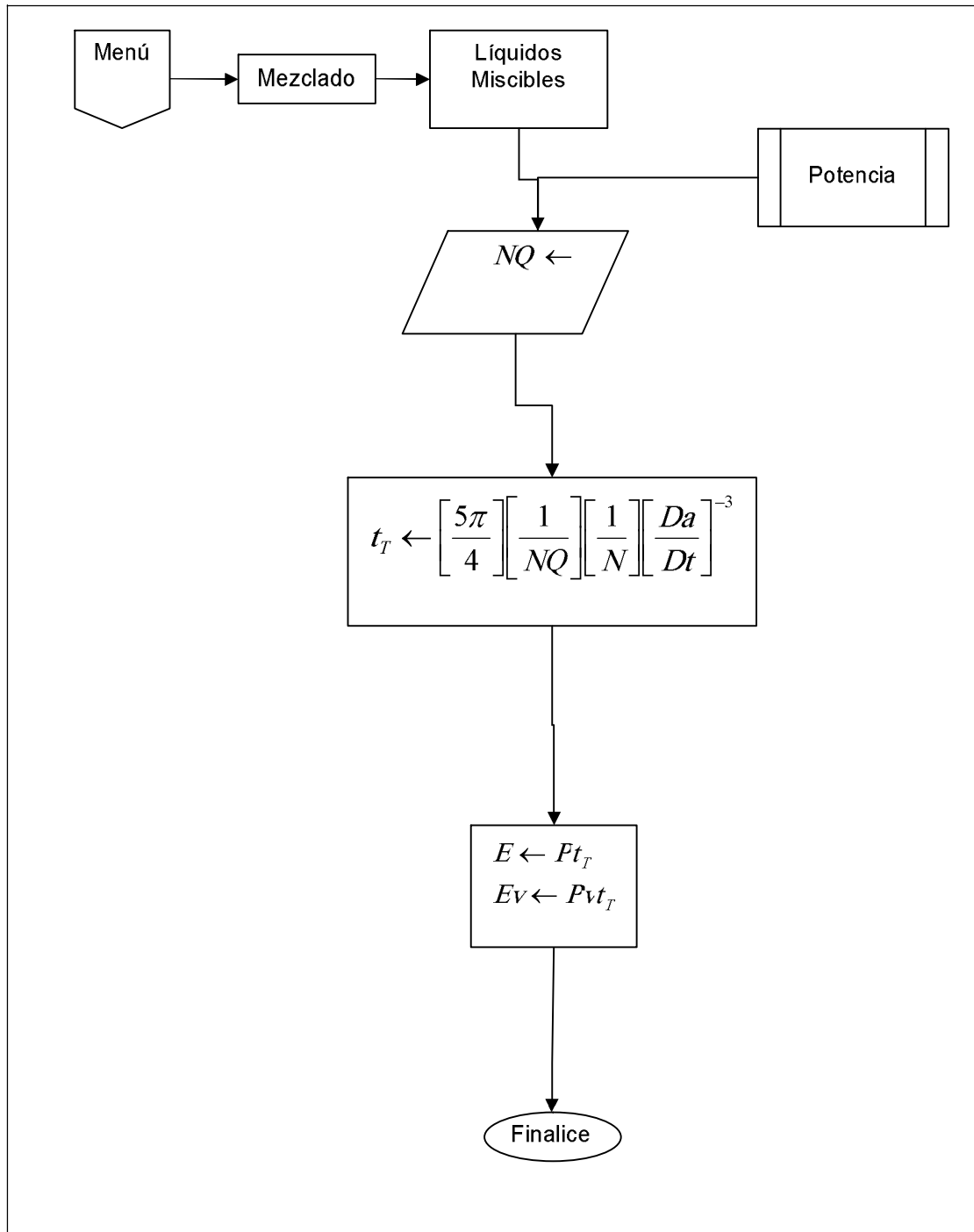


Figura 4. Diagrama de flujo para el proceso de mezclado de líquidos miscibles.

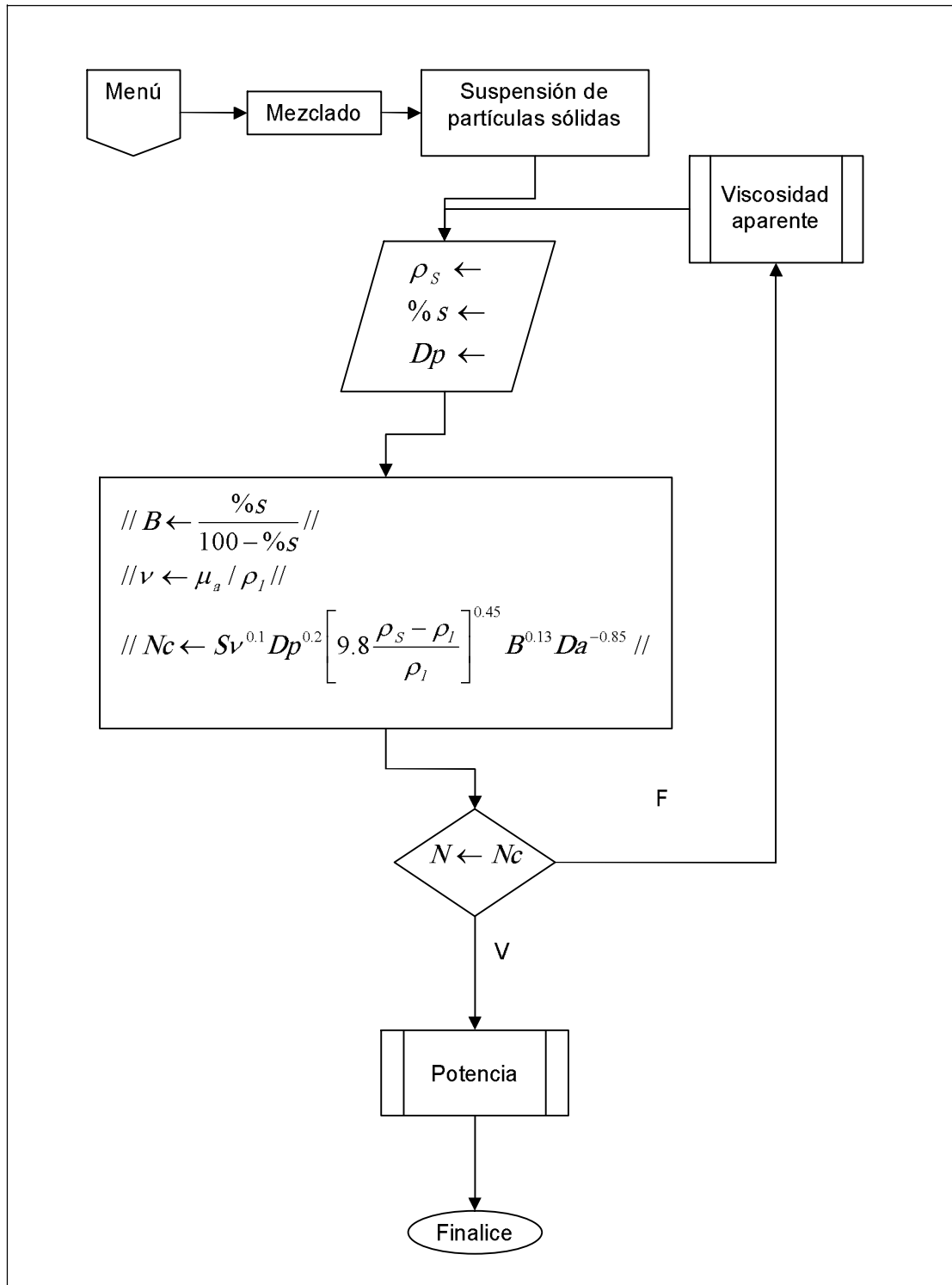


Figura 5. Diagrama de flujo de suspensión de partículas sólidas.

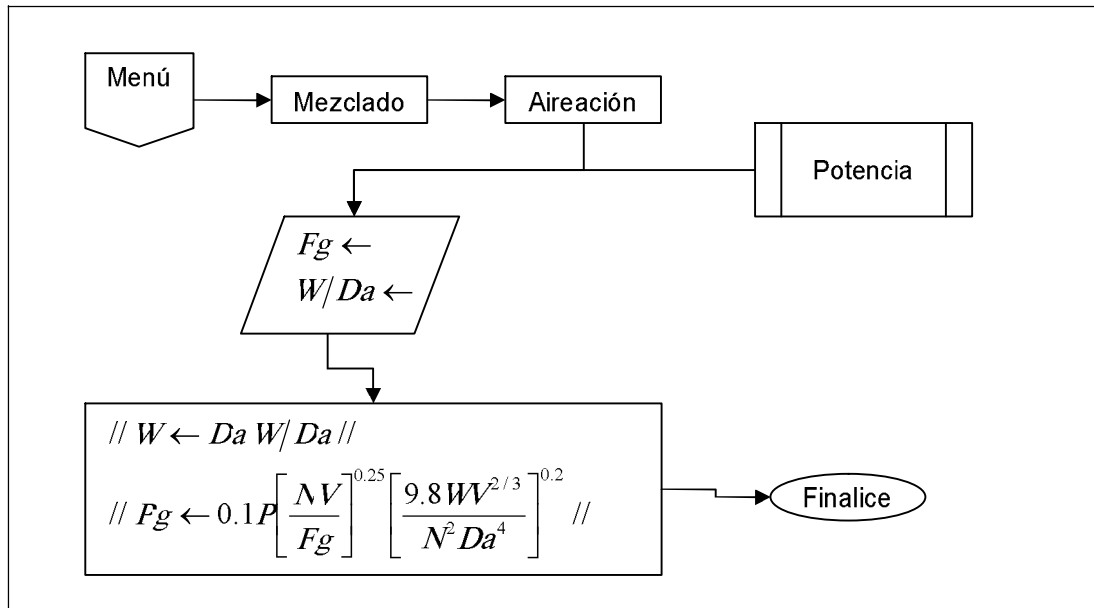


Figura 6. Diagrama de flujo de agitación con aireación.

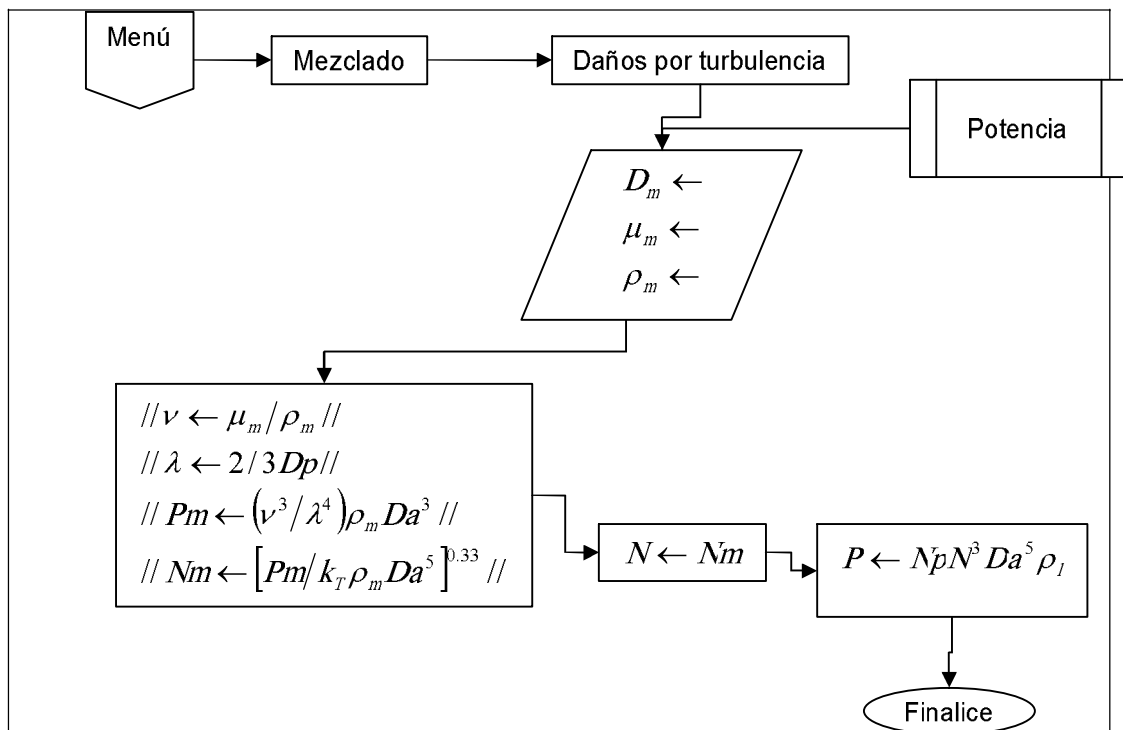


Figura 7. Diagrama de flujo de velocidad mínima de daños por cizalladura turbulenta.

4.4 MANUAL DEL USUARIO.

El siguiente manual del usuario desarrollado para MixBry 1.0 constituye una herramienta importante como guía de los usuarios del sistema al mostrar en pantallazos por pasos los esquemas lógicos, representados con anterioridad.

- 1] Al iniciar MixBry 1.0 lo primero que se observa (figura 8) es el panel de presentación e inicio del sistema, en el se observan habilitados el menú principal de LabView 7.1 y los botones creados que representan las ayudas, un Stop del programa, el botón salir y en la parte inferior, el botón de inicio del programa. Para ejecutar el software se presiona sobre el botón ejecutar, luego debe hacerse clic en el botón de inicio.

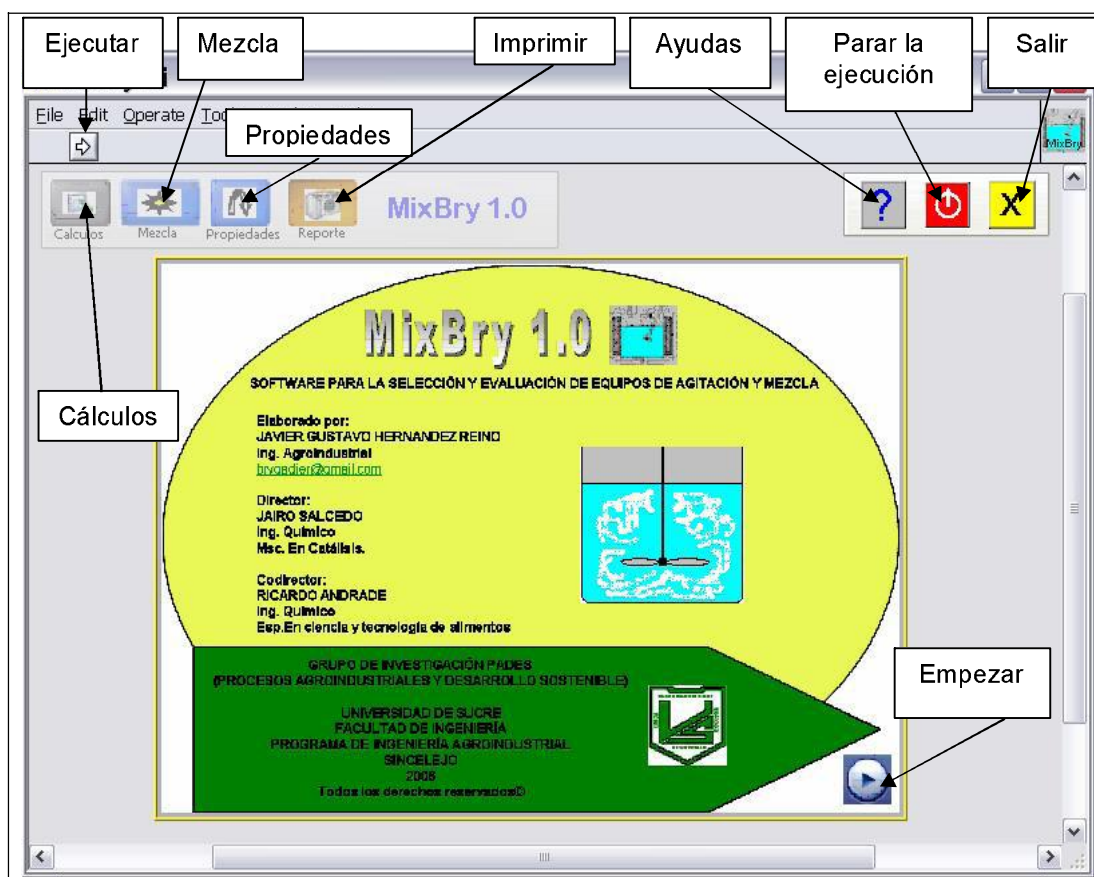


Figura 8. Panel de inicio.

- 2] Elegir la opción con la que se desea trabajar constituye un paso fundamental en el que se definen el líquido y las propiedades que se necesitan para el proceso. Se presentan dos opciones principales en las que el usuario debe elegir entre trabajar con un líquido específico del sistema o uno cuyas propiedades conozca el usuario (figura 9).

The screenshot shows the 'MixBry 1.0' software interface. At the top, there is a menu bar with icons for 'Calculos', 'Mezcla', 'Propiedades', and 'Reporte'. The main window has a blue header with the text 'ELIJA LA OPCIÓN CON LA QUE DESEA TRABAJAR'. Below this, there are two radio button options: 'AGITAR UN LÍQUIDO' (selected) and 'AGITAR UNA MEZCLA DE DOS LÍQUIDOS'. To the right of these options, there are input fields for 'Densidad del fluido en Kg/m3' (919,971), 'Índice de consistencia en Pa.s^n' (0,0443874), and 'Índice de flujo' (1). An 'Aceptar' button is located below these fields. Below the header, there are two tabs: 'Líquidos Newtonianos' and 'Líquidos No Newtonianos'. The 'Líquidos Newtonianos' tab is active, showing a temperature slider set to 30°C, a liquid selection dropdown set to 'Aceite de maíz', and a thermometer graphic. Below the thermometer, there are two yellow boxes displaying 'Viscosidad en Pa.s' (0,0443874) and 'Densidad en Kg/m3' (919,972).

Figura 9. Panel de propiedades. Opción agitar un líquido.

- 3] La segunda opción consiste en trabajar con una mezcla de dos líquidos que estén contemplados en el software o que en su defecto conozca el usuario con sus propiedades e incluir el porcentaje en que se adiciona el segundo líquido (figura 10).



Figura 10. Panel de propiedades. Opción agitar una mezcla de dos líquidos.

- 4] Al hacer clic en aceptar el sistema asumirá los valores presentes en los indicadores numéricos que se encuentran inmediatamente encima del comando aceptar y dará paso a las opciones inhabilitadas que se encuentran en el extremo superior izquierdo de la pantalla (figura 11), en esta barra de trabajo se encuentran en orden de izquierda a derecha el botón “abrir”, el comando de opción de proceso, y el comando para el cambio de propiedades de líquidos.



Figura 11. Cuadro de trabajo habilitado.

- 5] Al pulsar el botón “Cálculos” se abre el panel de proceso predeterminado en agitación sin casos de mezclado el cual presenta en el lado izquierdo una columna en la que se hallan las variables independientes externas que son el tipo de agitador (figura 12), velocidad de agitación, relación entre los diámetros del agitador y el tanque y el diámetro del agitador. Inmediatamente a la derecha los indicadores del proceso de agitación sin mezclado, en él están representados los valores correspondientes al volumen de proceso, diámetro del tanque, viscosidad aparente, densidad del fluido, número de Reynolds, número de potencia, potencia y potencia por unidad de volumen.

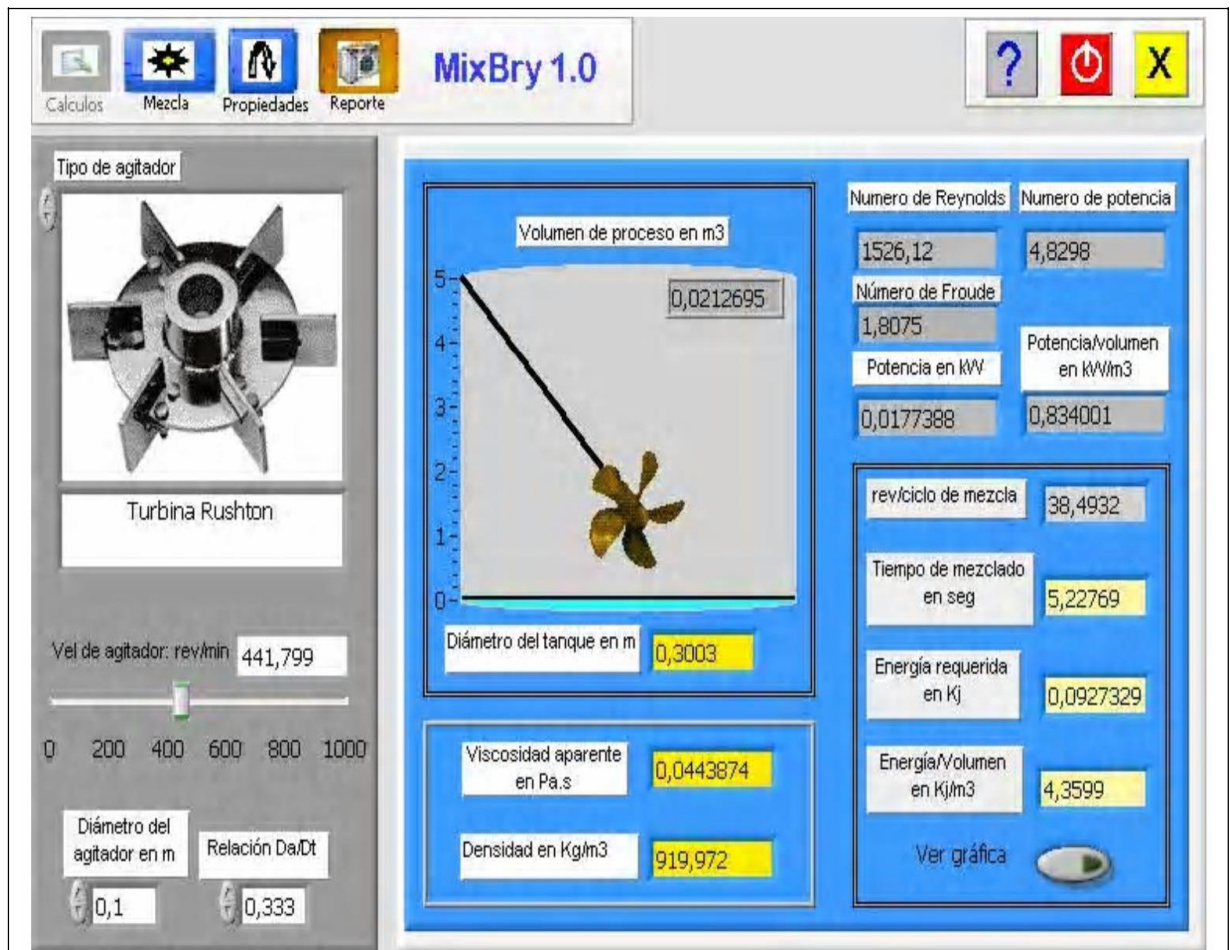


Figura 12. Opción calcular, para los datos de consumo de potencia.

- 6] Si se desea trabajar con los casos de mezclado, se pulsa el comando de operaciones que aparece en modo “Mezclado” que muestra un container tipo <<Tab Control>> que contiene cuatro casos de uso (figura 13) que son: “suspensión de partículas sólidas”, “aireación” y “daños por cizalladura turbulenta”, descritas en el estado del arte, también se añadieron accesorios como gráficas en los casos de mezclado de líquidos miscibles y aireación respectivamente, que buscan facilitar el análisis de las variables de proceso; todos los casos de uso finalizan sus cálculos al modificar, la potencia consumida para

que las operaciones tengan el desempeño que se requiere por parte del diseñador.

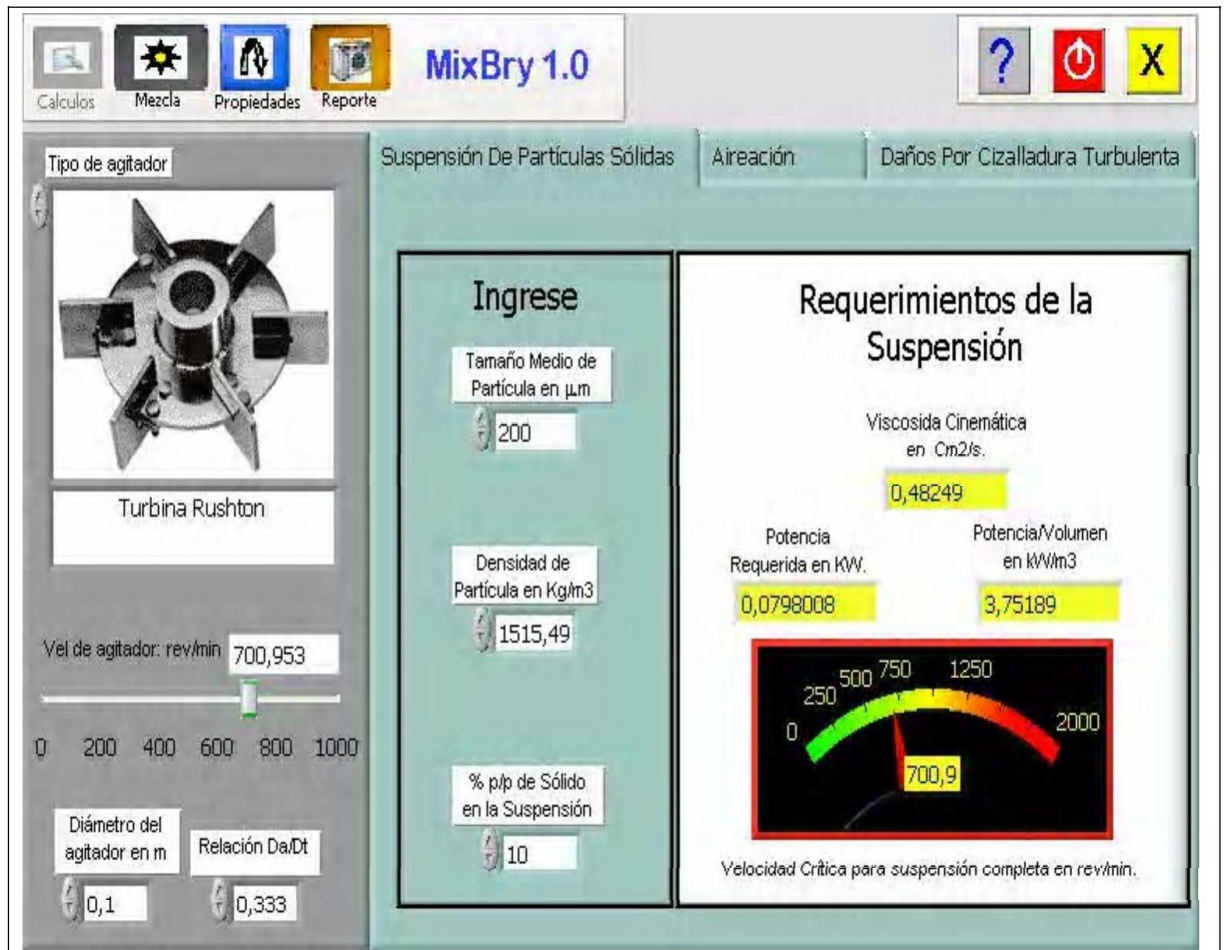


Figura 13. Módulo mezcla, opción mezclado de líquidos miscibles.

- 7] Es probable que se quieran cambiar las propiedades del fluido con que se realiza la operación virtual, entonces se hace clic en el comando propiedades que se encuentra situado a la derecha del comando de operaciones, como se observa este que habilitado, únicamente en la barra de trabajo, lo que demuestra la obligación de definir las propiedades del fluido para que el software pueda continuar.

Al finalizar pulse el comando salir y aparecerá un cuadro de diálogo (figura 14) que preguntará si realmente desea salir del programa.

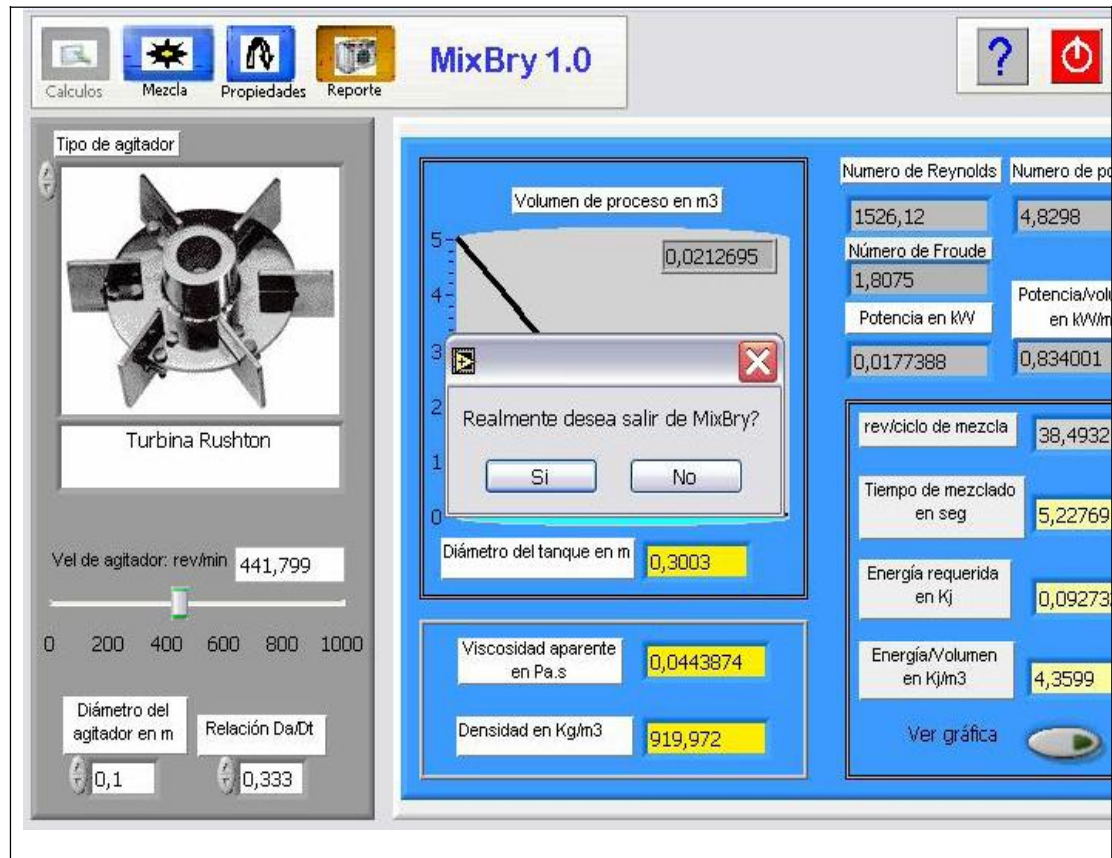


Figura 14. Cuadro de diálogo para la opción de salir del programa.

4.5 FASE DE PRUEBAS.

Tomando los siguientes ejemplos se procedió a realizar las pruebas del software.

4.5.1 Ejemplo 9.1. (McCABE 2006). Consumo de potencia.

Una turbina de seis palas planas se instala centralmente en un tanque vertical. El tanque tiene 6 pies (1,83 m) de diámetro; la turbina tiene 2 pies (0,61 m) de diámetro y está situada 2 pies (0,61 m) por encima del fondo del tanque. Las palas de la turbina tienen una anchura de 6 pulg. El tanque está lleno hasta una altura de 6 pies (1,83 m) con una disolución de sosa cáustica al 50 por 100 a 150 °F (65,6 °C), que tiene una viscosidad de 12 CP y una densidad de 93,5 lb/pie³ (1498 kg/m³). La turbina gira a 90 rpm. El tanque está provisto de placas deflectoras. ¿Qué potencia se requiere para la operación del mezclador?

Para el cálculo del número de Reynolds, los valores que se requieren, en unidades consistentes, son

$$D_a = 2 \text{ pies}$$

$$N = 90 \text{ rpm} / 60 = 1.5 \text{ r} / \text{s}$$

$$\mu = 12 \text{ cP} \times 6.72 \times 10^{-4} = 8.06 \times 10^{-3} \text{ lb} / \text{pies} - \text{s}$$

$$\rho = 93.5 \text{ lb} / \text{pie}^3$$

$$g = 32.17 \text{ pies} / \text{s}^2$$

$$\text{Re} = \frac{1.5 \text{ r} / \text{s} (2 \text{ pies})^2 93.5 \text{ lb} / \text{pie}^3}{8.06 \times 10^{-3}} = 69600$$

A partir de la tabla 4 de los anexos para Re = 69 600, Np = 6,0, y a partir de la ecuación 8.

$$P = 6 \left[\frac{93.5 \times 1.5^3 \times 2^5}{32.17} \right] = 1883 \text{ pies} - \text{lb} / \text{s}$$

$$P = 1883 / 550 = 3.42 \text{ CV} (2.55 \text{ kW})$$

En MixBry 1.0 se introdujeron los datos de viscosidad y densidad en el panel de propiedades y se abrió el panel de consumo de potencia obteniendo los datos que se muestran en la ilustración 1. Como se puede observar el número de Reynolds es 69692.8, el número de potencia es 6 y la potencia consumida de 2.56424 kW.

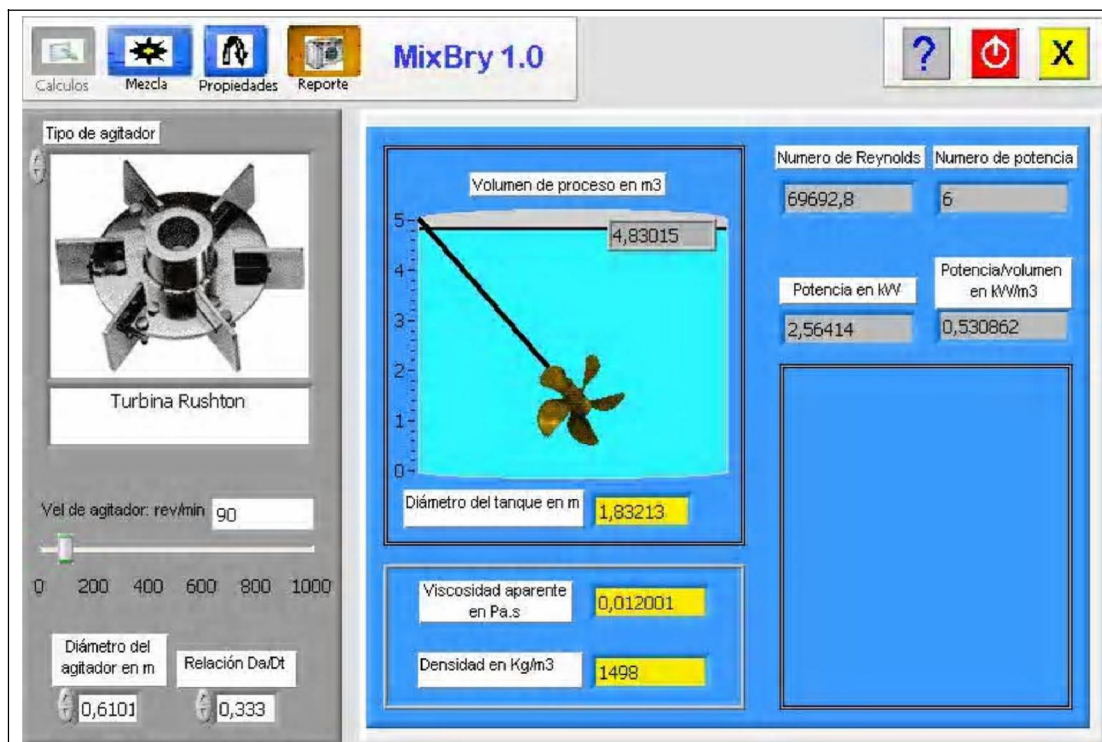


Ilustración 1. Prueba del MixBry 1.0, ejemplo 1.

Si se comparan los dos resultados de potencia, tomando como parámetro el ejercicio principal.

$$\%Error = \left[\frac{2.56424 - 2.55}{2.55} \right] \times 100 = 0.558\%$$

Se obtiene así, un margen de error de 0.56% por encima del valor obtenido en el ejercicio, esto es justificable si se sabe que el software trabaja con seis cifras decimales, aún sin hacer la observación de que el error es poco significativo.

4.5.2 Ejemplo 3.4-I. (GEANKOPLIS, Christie J. 1999) Consumo de potencia en un agitador.

En un tanque se instala un agitador de turbina de aspas planas que tiene seis aspas. El diámetro del tanque D_t mide 1.83 m el diámetro de la turbina $D_a=0.61$ m, $D_t = H$ y el ancho $W= 0.122$ m. El tanque tiene cuatro deflectores, todos ellos con un ancho $J= 0.15$ m. La turbina opera a 90 rpm y el líquido del tanque tiene una viscosidad de 10 cP y densidad de 929 Kg./m³.

a) Calcúlense los kilowatts requeridos para el mezclador.

b) Con las mismas condiciones (excepto que la solución tiene ahora una viscosidad de 100000 cP, vuélvase a calcular la potencia requerida.

a)

$$\mu = 10 \text{ cP} \times 1 \text{ Pa.s} / 1000 \text{ cP} = 0.01 \text{ Pa.s}$$

$$\rho = 929 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$D_a = 0.61 \text{ m}$$

$$N = 90 \text{ rpm} = 1.5 \text{ r} / \text{s}$$

$$\text{Re} = \frac{929 \text{ kg} / \text{m}^3 \cdot 1.5 \text{ r} / \text{s} \cdot (0.61 \text{ m})^2}{0.01 \text{ Pa.s}} = 51850$$

$$\text{Re} = 51850, K_t = 6$$

$$P = 6 \cdot 929 \text{ kg} / \text{m}^3 \cdot (1.5 \text{ r} / \text{s})^3 \cdot (0.61 \text{ m})^5 = 1588.87 \text{ W} = 1.589 \text{ kW}$$

b)

$$\mu = 100000 \text{ cP} \times 1 \text{ Pa.s} / 1000 \text{ cP} = 100 \text{ Pa.s}$$

$$\text{Re} = \frac{929 \text{ kg/m}^3 \cdot 1.5 \text{ r/s} \cdot (0.61 \text{ m})^2}{100 \text{ Pa.s}} = 5.18$$

$$\text{Re} = 5.18, \text{Np} = 14.$$

$$P = 14 \cdot 929 \cdot (1.5)^3 \cdot (0.61)^5 = 3.71 \text{ kW}$$

En el software al introducir los datos resultó como se presenta en la ilustración 2 para la parte a) del ejercicio un valor de 1.59kW, así:

$$\% \text{Error} = \left[\frac{1.59 - 1.589}{1.589} \right] \times 100 = 0.0629\%$$

Para el inciso b) del segundo ejemplo, se obtuvo en el software (ilustración 3) una potencia requerida de 3.57671kW, mientras el ejercicio desarrollado por (GEANKOPLI. 1999) arrojó un resultado de 3.71kW, entonces.

$$\% \text{Error} = \left[\frac{3.57671 - 3.71}{3.71} \right] \times 100 = -3.59\%$$

Este error corresponde (aunque poco significativo) al paradigma de cálculo utilizado por el autor del ejemplo, en el que en el régimen laminar utilizó la ecuación 8 consignada en el marco teórico y no la ecuación 6 utilizada por el software.

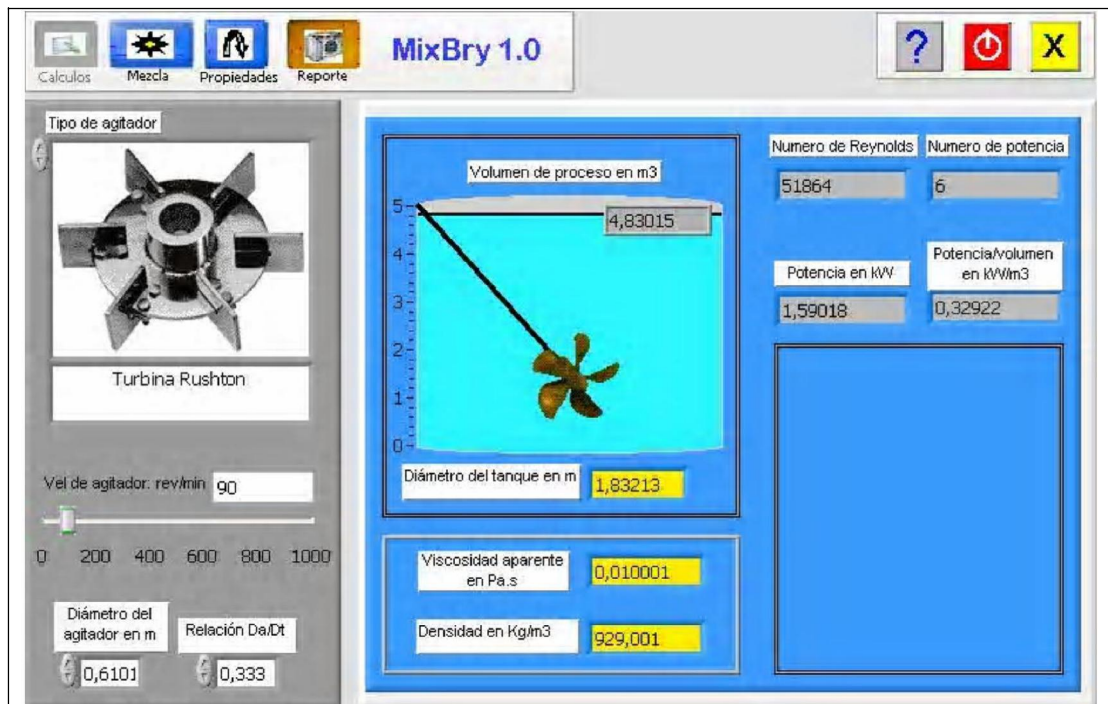


Ilustración 2. Prueba a) del ejemplo 2.

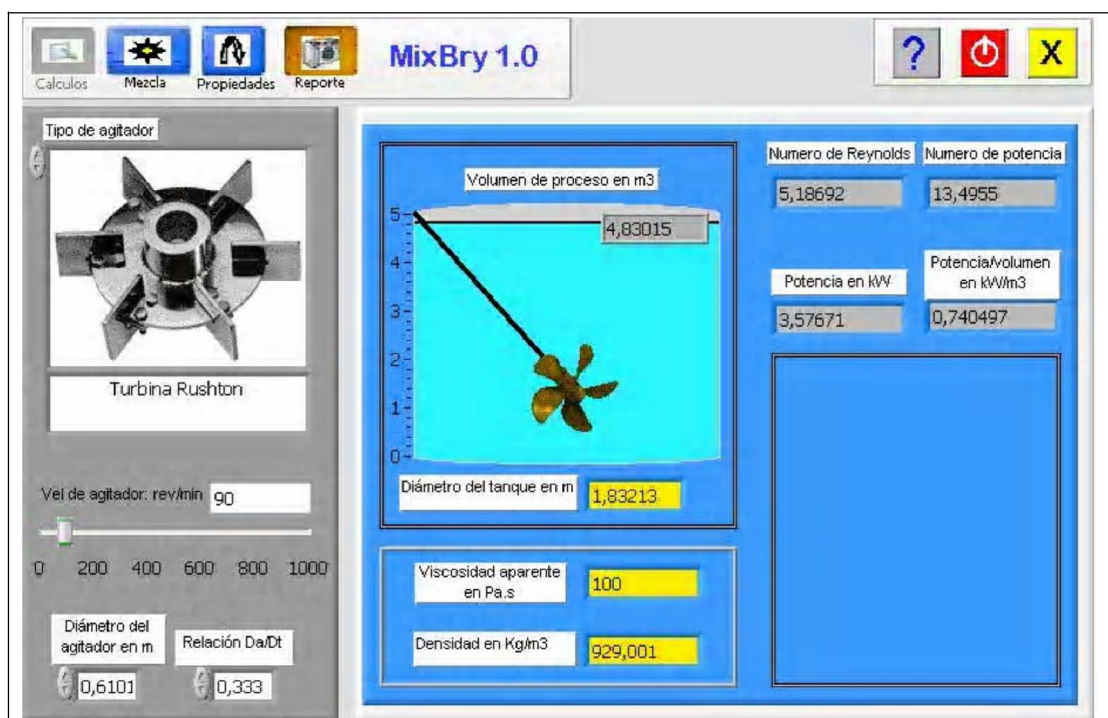


Ilustración 3. Prueba b) del ejemplo 2.

4.5.3 Ejemplo 9.3. (McCABE 2006). Mezcla de líquidos miscibles.

Un tanque agitado de 6 pies (1,83 m) de diámetro contiene una turbina de seis palas rectas de 2 pies (0,61 m) de diámetro, situada un diámetro del rodete por encima del fondo del tanque, y que gira a 80 rpm. Se ha propuesto este tanque para neutralizar una disolución acuosa diluida de NaOH a 70°F con una cantidad estequiométricamente equivalente de ácido nítrico concentrado (HNO₃). La altura final del líquido en el tanque ha de ser 6 pies (1,83 m). Suponiendo que todo el ácido se añade al tanque de una vez, ¿cuánto tiempo se requiere para que la neutralización sea completa?

$$\mu = 0.00098 Pa.s$$

$$\rho = 997.95 kg/m^3$$

$$Da = 0.61m$$

$$N = 80 rpm = 1.333 r/s$$

$$Re = \frac{997.95 kg/m^3 \cdot 1.333 r/s \cdot (0.61m)^2}{0.00098 Pa.s} = 503000$$

$$Re = 503000, Nt_r = 36$$

$$t_r = \frac{36}{1.333 r/s} = 27s$$

Al introducir los datos del ejemplo en MixBry 1.0, este arroja un tiempo de mezclado de 28.8699s, debido al uso del paradigma de cálculo del número de flujo utilizado por el software, mientras McCABE, utiliza un método analítico, en el que se basa en el factor de tiempo de mezcla (ver inciso 2.5.1).

$$\%Error = \left[\frac{28.8699 - 27}{27} \right] \times 100 = 6.925\%$$

Este error es quizá el mayor obtenido, lo que indica que los datos arrojados por el software, ya sea por un método de cálculo diferente, no varían de manera demasiado apreciable, y que los cálculos hechos por MixBry 1.0 muestran un alto grado de fiabilidad para el usuario.

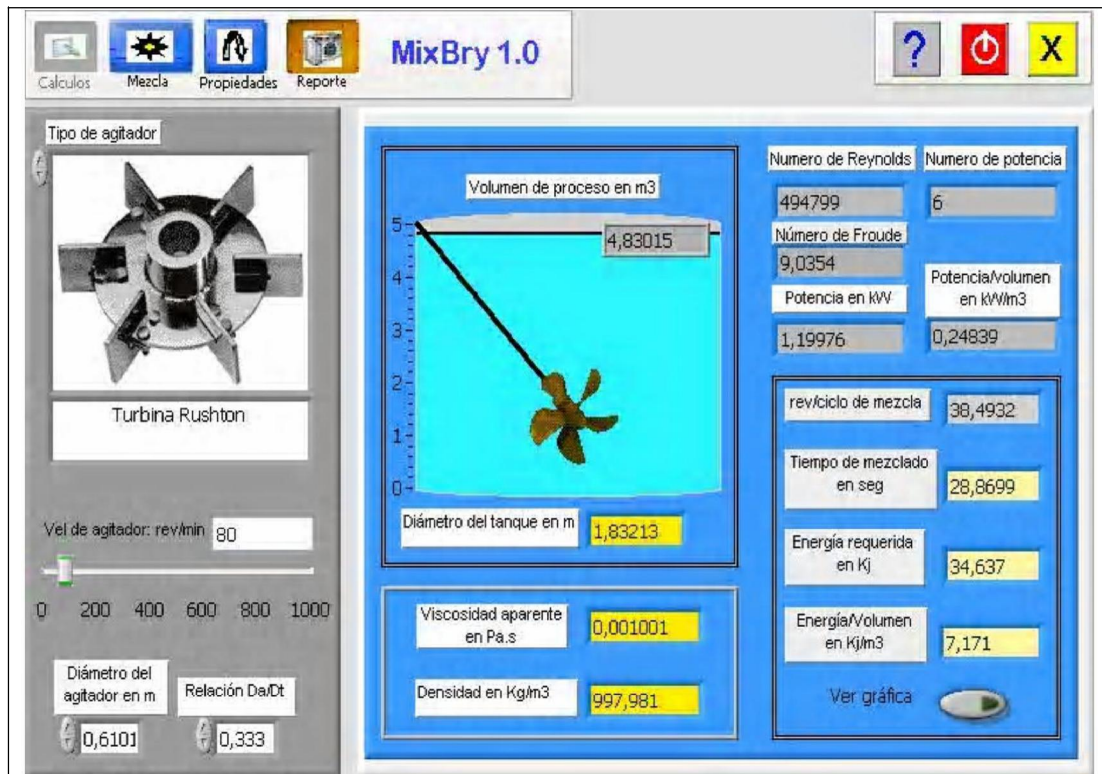


Ilustración 4. Prueba del ejemplo 3.

4.5.4 Ejemplo 9.4. (McCABE 2006). Suspensión de partículas sólidas.

Un tanque agitado de 6 pies (1,83 m) de diámetro que opera con un espesor de líquido de 8 pies (2,44 m) se utiliza para preparar una suspensión de espato flúor de 150 mallas en agua a 70 °F. El sólido tiene una densidad relativa de 3,18 y la suspensión contiene 25 por 100 de peso sólido. El rodete es una turbina de cuatro palas inclinadas de 2 pies (0,61 m) de diámetro situado a 15 pies sobre el fondo del tanque.

- a) ¿Cuál es la velocidad crítica del agitador para suspensión completa, suponiendo que dicha velocidad es la misma que para una turbina estándar?
- b) ¿Qué potencia se requiere?

$$Da / Dt = 0.3333$$

$$Da = 0.61m \rightarrow 61cm$$

$$S = 7.5(AnexoC)$$

$$\mu = 0.00098 Pa.s \rightarrow \nu = \frac{0.00098 Pa.s}{1000 kg / m^3} \times \frac{10000 cm^2}{1 m^2} = 0.0098 cm^2 / s$$

$$Dp = 104 \mu m \rightarrow 0.0104 cm$$

$$g \frac{\Delta \rho}{\rho} = 980 \frac{2.18}{1} = 2136 cm / s^2$$

$$B = \frac{0.25}{0.75} \times 100 = 33.3$$

$$a) Nc = 7.5(0.0098)^{0.1}(0.0104)^{0.2}(33.3)^{0.13}(2136)^{0.45}(61)^{-0.85} = 2.86 r / s = 172 rpm$$

$$b) \rho = \frac{1}{0.25 / 3.18 + 0.75} \times 1000 = 1207 kg / m^3$$

$$P = K_T \rho Nc^3 Da^5$$

$$P = 1.27(1207 kg / m^3)(2.86 r / s)^3(0.61 m)^5 = 3028.71 W = 3.029 kW$$

Como se observa, de este ejemplo la velocidad crítica es 172rpm y la potencia requerida es de 3.029kW, si se extrae el error del software cuyas respuestas fueron de 171.9rpm y 3.0486kW (ilustración 5) respectivamente, se tiene:

$$\%Error(N_c) = \frac{171.9 - 172}{172} \times 100 = -0.058\%$$

$$\%Error(P) = \frac{3.0486 - 3.029}{3.029} \times 100 = 0.647\%$$

Puede notarse entonces que el error obtenido es poco significativo, pero también que por pequeñas que sean las distorsiones de velocidad crítica, se obtienen grandes distorsiones de potencia a causa de la influencia que N_c tiene sobre la ecuación de potencia.

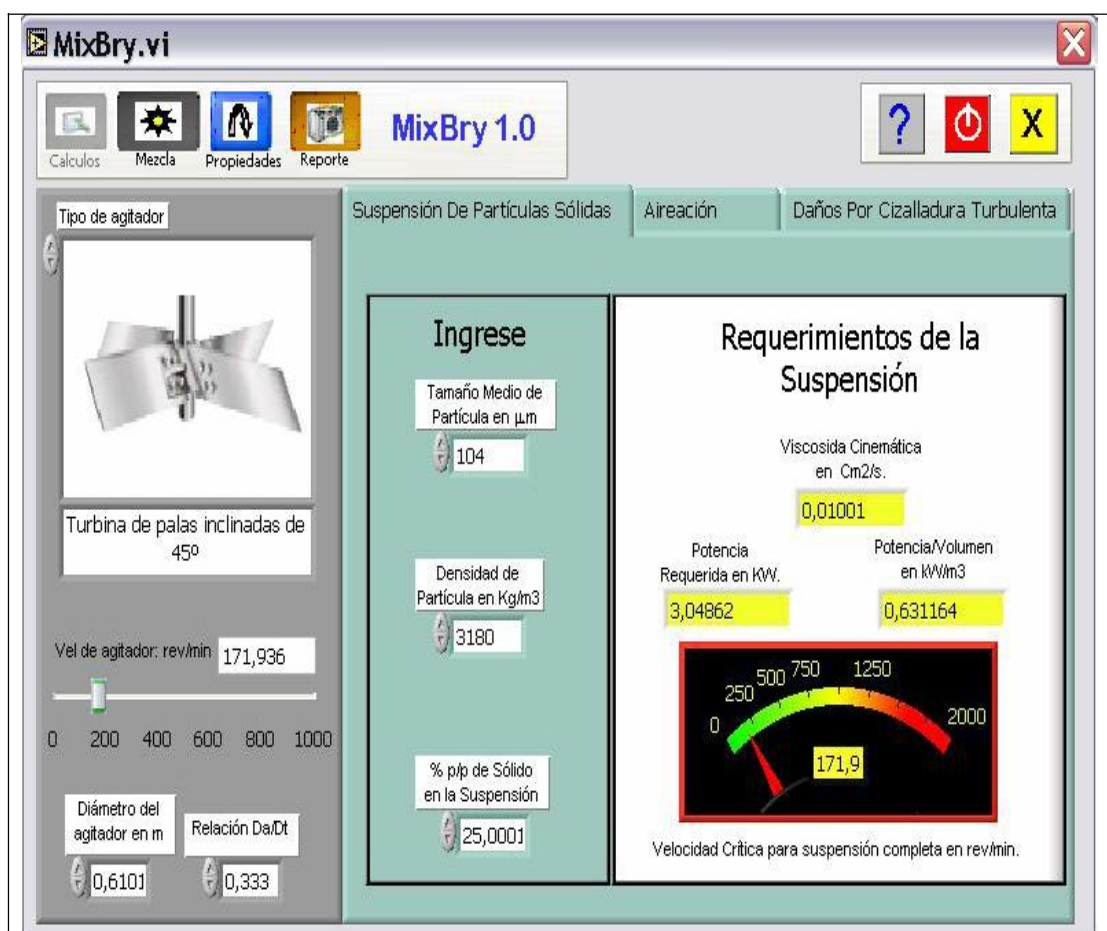


Ilustración 5. Suspensión de partículas sólidas, prueba del ejemplo 4.

4.5.5 Ejemplo 9.6. (McCabe). Dispersión de gases.

Un tanque cilíndrico de 2 m de diámetro, provisto de placas deflectoras, se agita con un rodete de turbina de 0,667 m de diámetro que gira a 180 rpm. El tanque contiene agua a 20 °C, a través de la cual se hacen pasar 100 m³/h de aire a la presión atmosférica. Calcúlese: El consumo de potencia total y por unidad de volumen de líquido.

Primeramente se calcula el consumo de potencia para el líquido sin gas, y después se corrige, mediante la Figura 9.21 (del libro), para tener en cuenta el efecto del gas. Para las condiciones del problema,

$$Da = 0.667 m$$

$$N = 180 rpm / 60 = 3 r / s$$

$$\rho = 1000 kg / m^3$$

$$\mu = 1 cP = 10^{-3} Pa.s$$

$$Fg = 100 m^3 / h$$

$$Re = \frac{3 r / s (0.667 m)^2 1000 kg / m^3}{10^{-3} Pa.s} = 1.33 \times 10^6$$

Para este rango de turbulencia, el Np=6,3, por lo que la potencia requerida es:

$$P = 6.3 (1000 kg / m^3) (3 r / s)^3 (0.667 m)^5 = 22456 W = 22.45 kW$$

El área de la sección transversal del tanque es $\pi D^2 / 4 = 3.14 m^2$, por tanto, la velocidad superficial del gas es:

$$Vs = \frac{Fg}{Area - Transversal} = \frac{100 m^3 / h}{3600 \times 3.14 m^2} = 0.00884 m / s$$

De acuerdo con la Figura 9.21 (del libro), $P_g/p = 0.65$ para un tanque de 2 m. Por tanto.

$$P_g = 0.65 \times 22.45 \text{ kW} = 14.59 \text{ kW}$$

$$V = \pi D t^3 / 4 = 3.14 \times 2 \text{ m}^3 = 6.28 \text{ m}^3$$

$$P_g / V = \frac{14.59 \text{ kW}}{6.28 \text{ m}^3} = 2.32 \text{ kW/m}^3$$

Cuando se introducen los datos fijados en el ejemplo a MixBry 1.0 (ilustración 6), se lanzan una potencia de 21.89kW, una potencia con aireación de 14.06kW y una potencia por unidad de volumen de 2.197 kW/m³, puede demostrarse la fidelidad que brinda el software en el caso de aireación al obtener el error:

$$\%Error(P) = \frac{21.89 - 22.45}{22.45} \times 100 = -2.49\%$$

$$\%Error(P_g) = \frac{14.06 - 14.59}{14.59} \times 100 = -3.63\%$$

$$\%Error\left(\frac{P_g}{V}\right) = \frac{2.197 - 2.32}{2.32} \times 100 = -5.3\%$$

Y de nuevo se arrojan resultados razonablemente aceptables si se tiene en cuenta que el error permanece siendo, en cada caso probado, poco significativo al tiempo que también se mantiene un rango de confianza de por lo menos 93%.

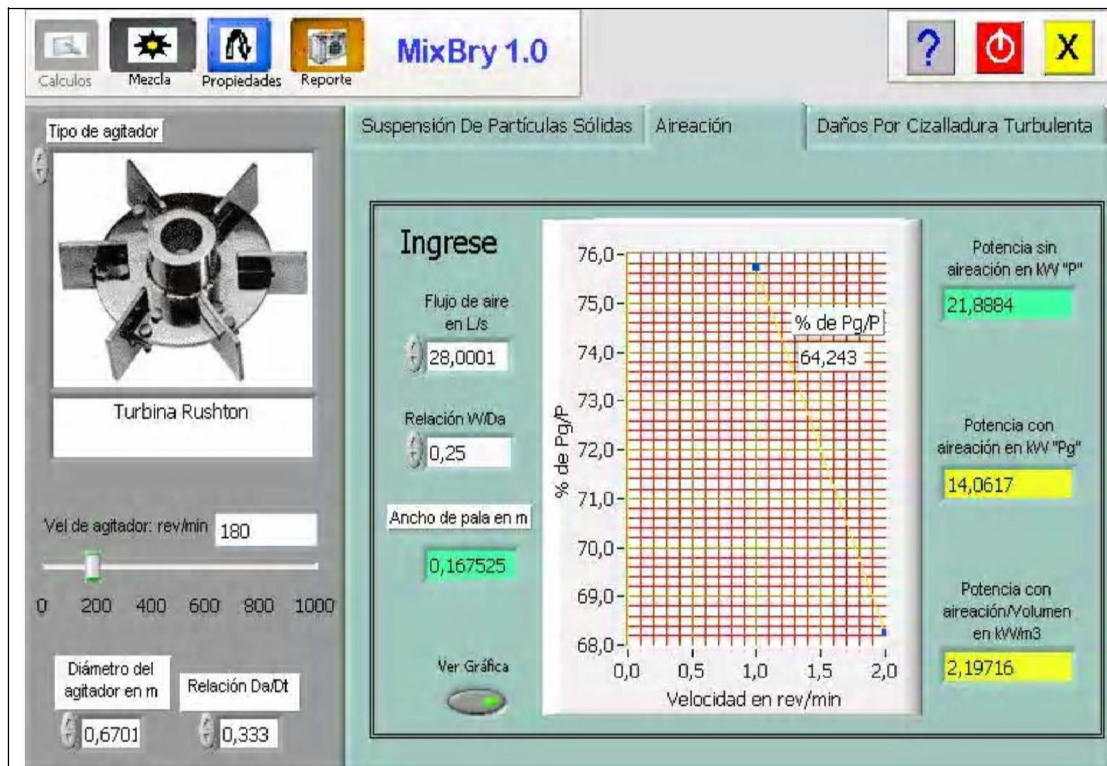


Ilustración 6. Aireación, prueba del ejemplo 5.

4.5.6 Ejemplo 7.3. (M. Doran. 1998). Condiciones de operación necesarias para causar daño por cizalla en turbulencias.

Se utilizan sólidos microportadores de $120\mu\text{m}$ de diámetro para cultivar células recombinantes de CHO para la producción de la hormona del crecimiento. Se propone utilizar un rodete de turbina de 6 cm para mezclar el cultivo en un tanque agitado de 3.5 litros. Se suministra aire y dióxido de carbono por borboteo sobre la cabeza del reactor. La solución microportadora tiene una densidad aproximada de 1010kg/m^3 y una viscosidad de 1.3×10^{-3} Pa.s. calcular la velocidad de agitación máxima permisible para evitar que las turbulencias produzcan daños por cizalla a las células.

El daño debido a remolinos se evita si la escala Kolmogorov permanece por encima de $2/3$ a $1/2$ del diámetro de los sólidos microportadores. La velocidad del agitador necesario para crear remolinos del tamaño $\lambda=2/3(120\text{ }\mu\text{m})=80\text{ }\mu\text{m}=8\times 10^{-5}\text{m}$. La potencia del agitador que produce remolinos de este tamaño puede calcularse utilizando la ecuación 20 y luego para la velocidad mínima la ecuación 19.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}}{1010 \text{ kg/m}^3} = 1.29 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\varepsilon = \frac{\nu^3}{\lambda^4} = \frac{(1.29 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^3}{(8 \times 10^{-5} \text{ m})^4} = 0.052 \text{ m}^2/\text{s}^3$$

$$Pm = (0.052 \text{ m}^2/\text{s}^3)(1010 \text{ kg/m}^3)(6 \times 10^{-2} \text{ m})^3 = 1.13 \times 10^{-2} \text{ W} = 1.13 \times 10^{-5} \text{ kW}$$

$$Nm = \sqrt[3]{\frac{1.13 \times 10^{-2} \text{ W}}{(6)(1010 \text{ kg/m}^3)(6 \times 10^{-2} \text{ m})^5}} = 1.338 \text{ r/s} \rightarrow Nm = 80.309 \text{ rpm.}$$

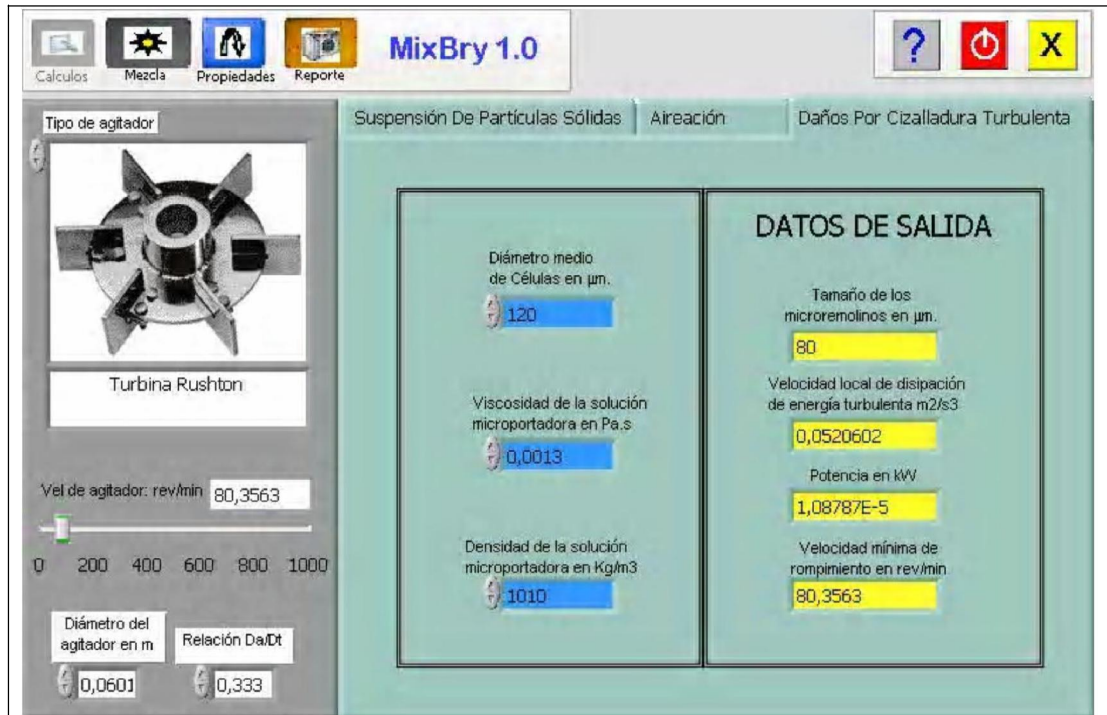


Ilustración 7. Daños por turbulencia, ejemplo 6.

Como se puede ver según el ejemplo los datos obtenidos por MixBry 1.0 son muy cercanos a los arrojados por el procedimiento descrito por M. Doran, mientras el ejemplo arroja una potencia de 1.13×10^{-5} kW y una velocidad mínima de 80.309rpm. MixBry desprende (ilustración 7) 1.088×10^{-5} kW de potencia y 80.35 rpm de velocidad mínima aproximadamente.

$$\%Error(Pm) = \frac{1.088 - 1.13}{1.13} \times 100 = -3.71\%$$

$$\%Error(Nm) = \frac{80.35 - 80.309}{80.309} \times 100 = 0.051\%$$

Al mirar el porcentaje de error puede constatararse lo dicho anteriormente, de manera que MixBry demuestra la fiabilidad de sus cálculos.

4.6 AYUDAS DEL SOFTWARE.

MixBry 1.0 cuenta un archivo de ayudas desarrollado bajo el editor “shalom help maker” que posee un “contenido” en el que se encuentran todos los temas relacionados con el software, dando a conocer su soporte teórico y la información del mismo como se observa en la ilustración 8 y un cuadro que muestra información del equipo desarrollador denominado “acerca de MixBry 1.0” como se ve en la ilustración 9.



Ilustración 8. Contenido de la ayudas para MixBry 1.0

Acerca de MixBry 1.0

MixBry 1.0

**SOFTWARE PARA LA SELECCIÓN Y EVALUACIÓN DE EQUIPOS DE
AGITACIÓN Y MEZCLA**

Equipo de trabajo

Desarrollador
JAVIER G. HERNANDEZ R.
Ing. Agroindustrial.
brygadier@gmail.com

Director
JAIRO G. SALCEDO M.
Ing. Químico, Msc. en Catálisis.
jasame@gmail.com

Codirector
RICARDO D. ANDRADE
Ing. Químico. Esp en Ciencia y Tecnología de alimentos.
randrade@unicordoba.edu.co

UNIVERSIDAD DE SUCRE
www.unisucree.edu.co/
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
SINCELEJO-COLOMBIA
2006
©

Ilustración 9. Información general de MixBry 1.0.

4.7 CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE.

- **Operatividad:** Al hacer las corridas experimentales, se puede apreciar claramente (inciso 4.5) que los datos obtenidos bajo ejemplos obtenidos de la bibliografía consignada, son comparativamente similares a los arrojados por el software y por tanto, confiables.
- **Legibilidad:** Para cualquier instrucción compleja con que ha sido probado MixBry 1.0, ha demostrado no presentar errores en tiempo de ejecución, ni en la lógica del sistema, y permite asimismo el análisis más detallado de dichas instrucciones.
- **Transportabilidad:** MixBry 1.0 está diseñado para ser utilizado bajo los PC Intel (familia Pentium y procesadores compatibles) y ser corridos en el sistema operativo Windows 2000 o XP con espacio libre en disco de 2000 KB mínimos para la ejecución del programa.
- **Claridad:** MixBry 1.0 muestra con claridad al usuario todas las variables y constantes que son utilizadas durante el cálculo realizado, estas variables son susceptibles de ser cambiada en cualquier momento pudiendo así entregar varios resultados en el menor tiempo posible, permitiendo un mejor análisis del proceso por parte del diseñador.
- **Modularidad:** El software presenta un menú en la parte superior de los cuadros de trabajo (véase Manual del usuario), con íconos que representan diferentes funciones de trabajo o casos de uso de MixBry 1.0, con lo que el usuario puede definir lo que desea hacer.

5 CONCLUSIONES.

MixBry 1.0 es una herramienta interactiva muy potente y como tal ofrece una ayuda al ingeniero de procesos en la modelación y diseño de sistemas de tanques de mezcla y/o agitación al facilitar la selección de los agitadores y mostrar las condiciones de proceso para un tipo determinado de operación de mezclado, como las descritas en el estado del arte.

Se observó que al hacer las corridas experimentales del software con respecto a los ejemplos mencionados en los resultados, se obtuvieron márgenes de error bastante bajos (véase el inciso 4.5) del orden de 7% máximo estimado, esto es un intervalo de confianza del 93%, lo que demuestra la alta confiabilidad que MixBry 1.0 ofrece a los usuarios.

Al comparar los resultados que MixBry 1.0 arrojó al hacer las pruebas de escritorio finales, se pudo notar que los márgenes de error que se dieron discrepaban más a causa de los paradigmas de cálculo utilizados por los autores de los ejemplos utilizados, que por errores en la programación, esto demuestra que aún utilizando otros métodos de resolución de problemas de agitación y/o mezcla, pueden obtenerse resultados satisfactorios y confiables para el diseñador de procesos.

Al contar con archivos de ayuda, MixBry 1.0 mejora la interacción con el usuario, dado que esto permite que el mismo, obtenga información general a cerca del software y por otro lado que el usuario pueda observar con detalle los mecanismos de cálculo que el software utiliza para cada caso de uso pudiendo así confrontar estos con cualquier otro mecanismo de resolución de problemas de agitación y/o mezcla, validar sus datos y aprovechar la ventaja de reducción del tiempo de diseño al observar el mismo efecto con cualquiera de los agitadores que fueron incluidos en el software.

6 RECOMENDACIONES.

Para futuras versiones del software es necesario obtener mayores datos experimentales de un número más diverso de agitadores que se presentan en el comercio tecnológico de estos equipos y que también necesitan ser estudiados.

En lo posible los datos de cálculo deben ser confrontados con datos experimentales reales obtenidos en laboratorios especializados con los cuales se puede modelar de manera más precisa las condiciones de proceso, corroborar los resultados y validar el modelo utilizado para el desarrollo del software.

Añadir una herramienta activeX que permita relacionar los datos obtenidos con otras aplicaciones de Windows y un componente que permita el manejo de varios datos aplicados a varios agitadores a la vez, para obtener un reporte inmediato de varios equipos de agitación bajo las mismas condiciones de proceso en el mismo diagrama.

Desarrollar softwares de este tipo basados en modelación de líneas de corrientes, cálculos y modelación de perfiles de velocidad, de potencia y demás variables implicadas en los casos, a fin de proponer un trabajo de desarrollo y pruebas experimentales de nuevos equipos de agitación y mezcla.

ANEXOS

Anexo A.

FIGURAS Y TABLAS RELACIONADAS CON LA REOLOGÍA DE LOS LÍQUIDOS.

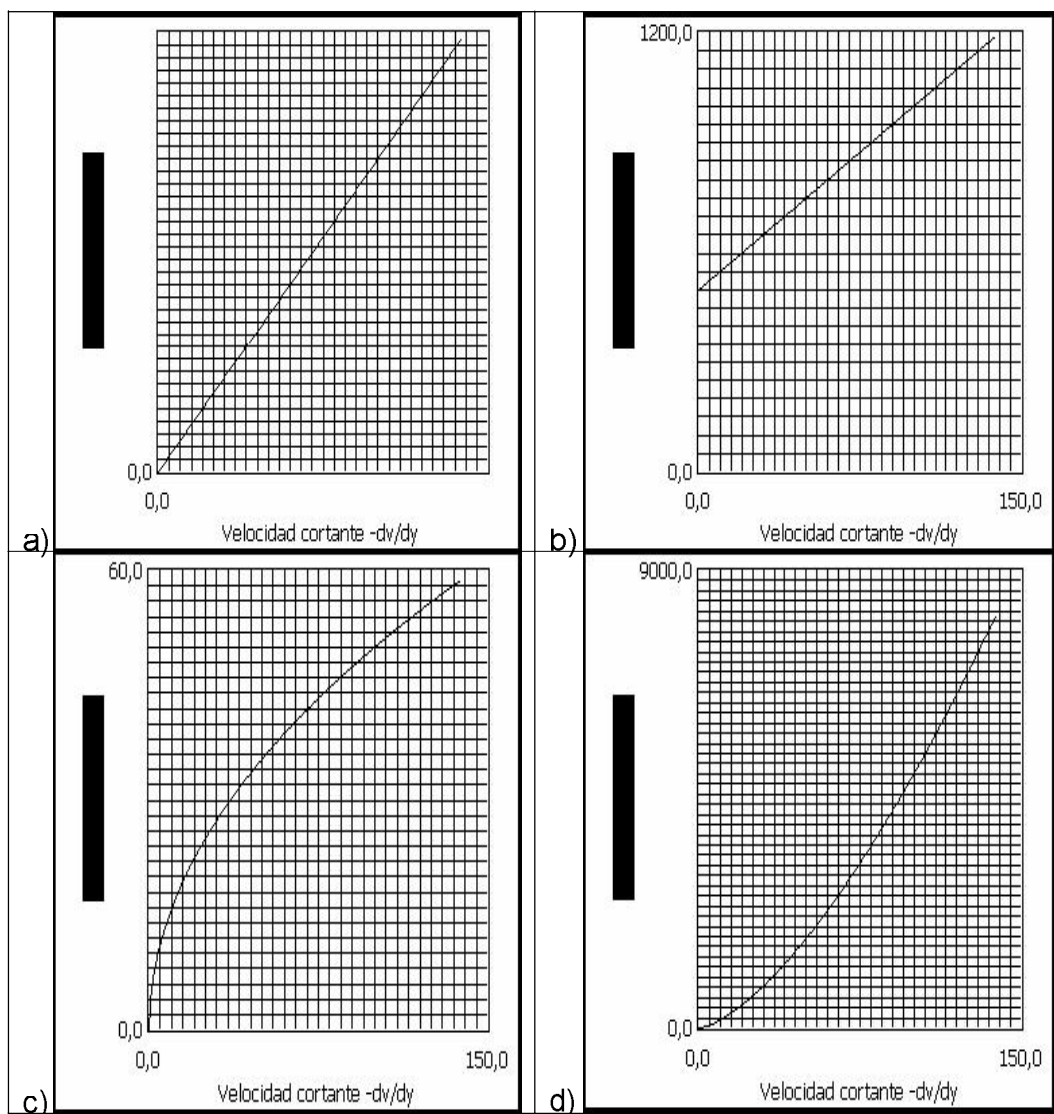


Diagrama de esfuerzo cortante para fluidos independientes del tiempo, a) Newtoniano, b) Plásticos de Bingham, c) Pseudoplásticos, d) Dilatantes.

Parámetros de fluidos newtonianos y sus funciones.

Líquidos Newtonianos	A	B	C
Aceite de maíz.*	-3.5581	-263.32	183.6
Jarabes de Maíz* DE=100, MS=20%	-4.45	-234.8	159.91
DE=42.9, MS=20%	-4.0137	-129.07	201.23
DE=35.4, MS=20%	-5.5478	-868.35	0
DE=35.4, MS=50%	-3.8025	-258.1	186.88
DE=42.9, MS=50%	-3.9975	-267.36	182.96
DE=75.4, MS=20%	-5.8508	-924.84	0
Etanol*	-5.5972	-846.95	-24.124
Etilenglicol*	-4.5448	-417.05	146.53
Aceite de Maní*	-3.9621	-407.46	151.53
Aceite de almendras*	-4.4802	-597.2	1119.99
Aceite de soya*	-4.4977	-581.28	115.71
Aceite de girasol*	-3.6505	-304.27	168.98
Agua*	-4.5318	-220.57	149.39
Glicerina*	-2.336	-199.778	-58.3583
Soluciones de agua-azúcar, x=°Brix*	$1.6473+0.011735x-0.00012799475x^2$	$-263.92783+2.1x-0.07131x^2$	$-127.40695+0.177566x+0.003366x^2$
Leche homogenizada*	-0.90120368	- 94.51408	-58.517209
Acido esteárico*	-0.7529176	-435.24763	203.67767
Acido acético**	1210600	-3.6612	1
Leche entera**	3.4550161	0.97312	0.00091
Aceite de palma**	82.530065	0.97140161	1
Aceite de	84.345118	0.97250981	1

hígado de bacalao**			
Aceite de mostaza**	132.17334	0.97116266	1
Acido láurico**	14.308943	0.98117952	1
Acido oleico**	22.653133	0.98144269	1
Acido palmitico**	37.855371	0.97743837	1
Acetona***	9.1546x10^-5	-210.28829	1
Crema de leche, x=% grasa****	- 2.6+0.01309x+0.00 0148x^2	-0.024852/x- 0.008379935	1/(- 51.236559x^2+304 0.4945x)
* $\log \mu = A + \frac{B}{C - T}$			
** $\mu = CAB^T$			
*** $\mu = CA \frac{T}{B + T}$			
**** $Lcg\mu = a + bT + cT^2$			

Fuente: STEFFE, James F. 1996 Págs. 358-370.

Parámetros reológicos de algunos líquidos no newtonianos.

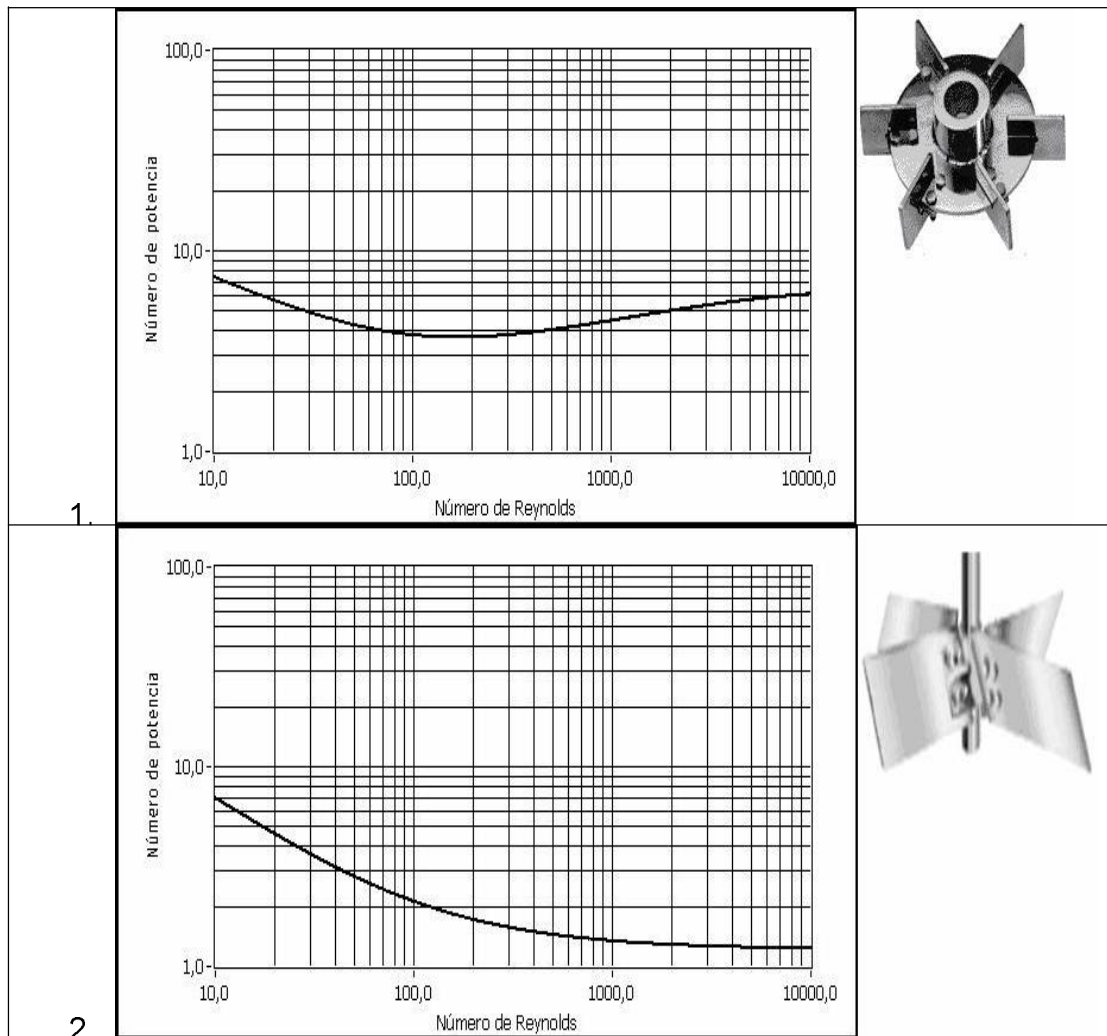
Líquidos no newtonianos	n'	K'
Malteada de chocolate a 46.1°C	0.574	0.57
Mayonesa a 25°C	0.55	6.4
Mostaza a 25°C	0.39	18.5
Pulpa de manzana a 25°C	0.084	65.03
Salsa de manzana a 30°C	0.3	11.6
Puree de albaricoque a 25°C	0.29	5.4
Puree de banano a 24°C	0.333	10.7
Pasta de bayas azules a 20°C	0.426	6.08
Puree de zanahoria a 25°C	0.228	24.16
Puree de frijoles verdes a 25°C	0.246	16.91
Puree de guayaba a 10.3°Brix y 23.4°C	0.494	39.98
Puree de mango a 24.2°C	0.334	20.58
Concentrado de naranja a 42.2°Brix y 25°C	0.585	4.121
Concentrado de piña a 40.3°Brix y 25°C	0.587	5.887
Puree de papaya 7.3°Brix y 26°C	0.528	9.09
Puree de melocotón a 30°C	0.28	7.2
Puree de peras a 30°C	0.35	5.6
Puree de ciruelas a 30°C	0.34	2.2
Puree de calabaza a 25°C	0.281	11.42
Concentrado de tomate 32.2°C	0.59	0.223
5.8°Brix		
12.8°Brix		
16°Brix		
	0.43	2
	0.45	3.6

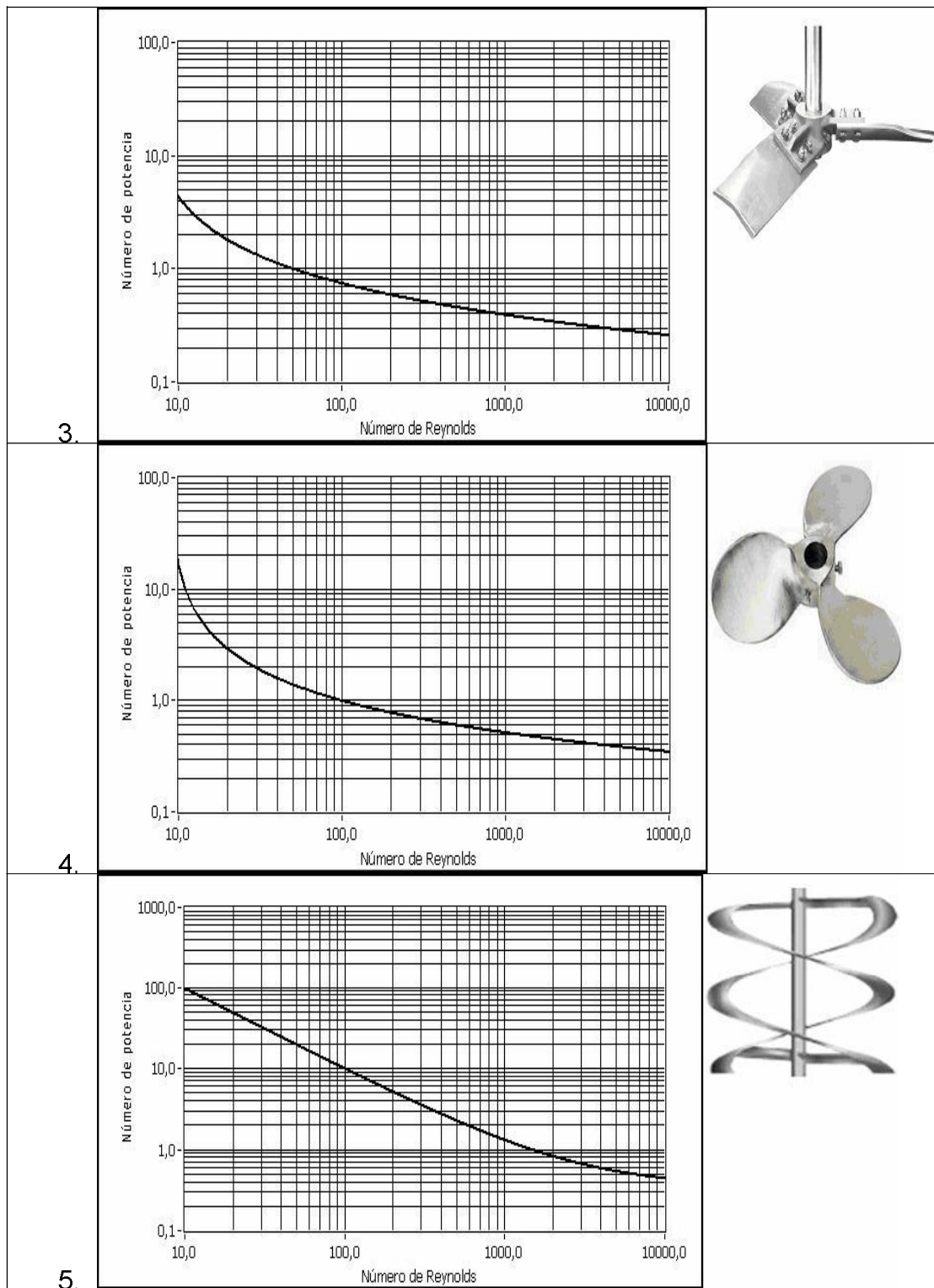
25°Brix	0.41	12.6
30°Brix	0.4	18.7
Base para helado a 30°C	0.117	335.84
Miel pura a 30°C	0.989	15.39
Salsa de tomate a 30°C	0.136	29.1
Queso crema a 30°C	0.058	422.3

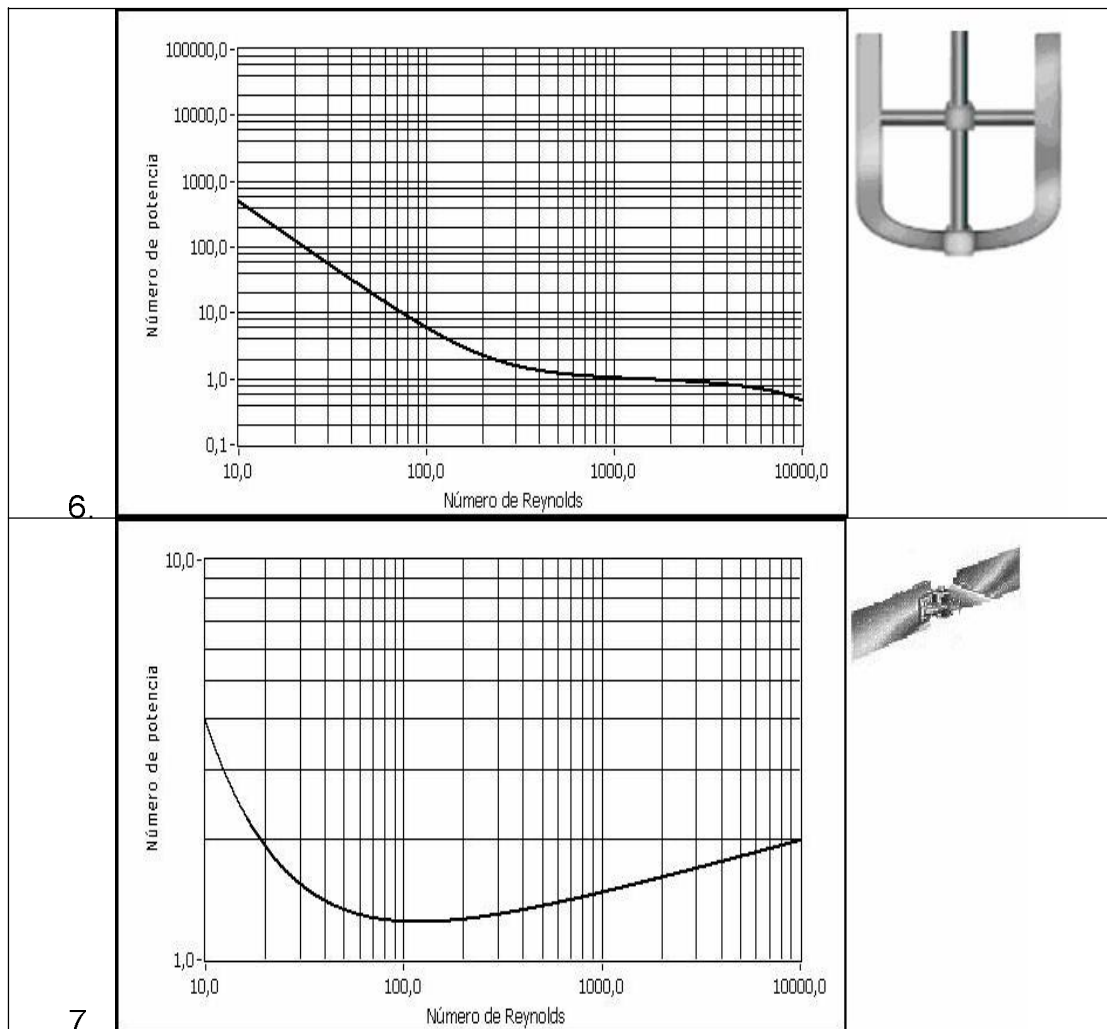
Fuente: STEFFE, James F. 1996 Págs. 358-370.

Anexo B.

GRÁFICAS DE NÚMERO DE POTENCIA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE REYNOLDS PARA DIFERENTES TIPOS DE AGITADORES UTILIZADOS.







Correlaciones de números de Reynolds y de Potencia, 1. Turbina Rushton, 2. Turbina de palas inclinadas de 45°, 3. Impulsor HE-3 (según McCabe. 2003. pág. 275), 4. Hélice paso cuadrado, 5. Cinta helicoidal, 6. Ancla o áncora, 7. Agitador de paletas o canaleta (según M. Doran 1998. pág. 156-158)

Anexo C.

CONSTANTES DE DISEÑO PARA TANQUES AGITADOS.

Factores de forma para suspensión de partículas sólidas

Tipo de rodete	Dt/Da	Dt/E	S
Turbina de 6 palas Da/W=5, Np=6.2	2	4	4.1
	3	4	7.5
	4	4	11.5
Agitador de dos palas Da/W=4 Np=2.5	2	4	4.8
	3	4	8
	4	4	12.5
Hélice de tres palas Np=0.5	3	4	6.5
	4	4	8.5
	4	2.5	9.5

Fuente: McCabe. 2003. pág. 290.

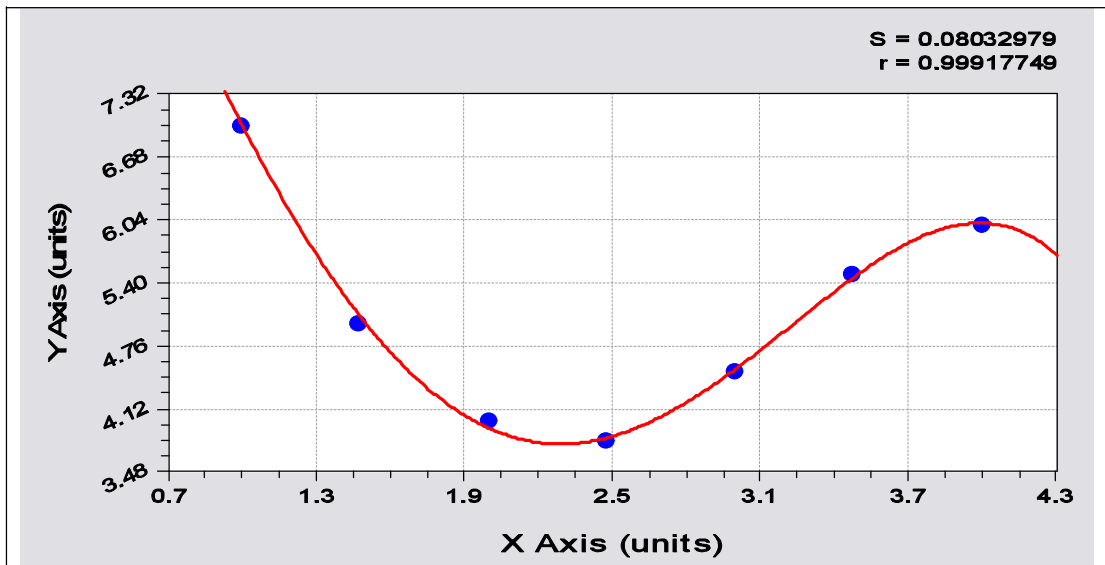
Datos de constantes de agitadores.

Tipo de impulsor	NQ	Kn	KI	Kt
Turbina Rushton	1.3	10-13	70	6
Turbina de 4 palas inclinadas de 45°	0.87	11	44.5	1.27
Impulsor HE-3	0.47	10	43	0.28
Hélice paso cuadrado	0.5	10	40	0.35
Cinta helicoidal paso cuadrado	0.48	30	1000	0.35
Ancla o áncora	0.61	20-25	420	0.53
Canalete	0.31416	11	35	2

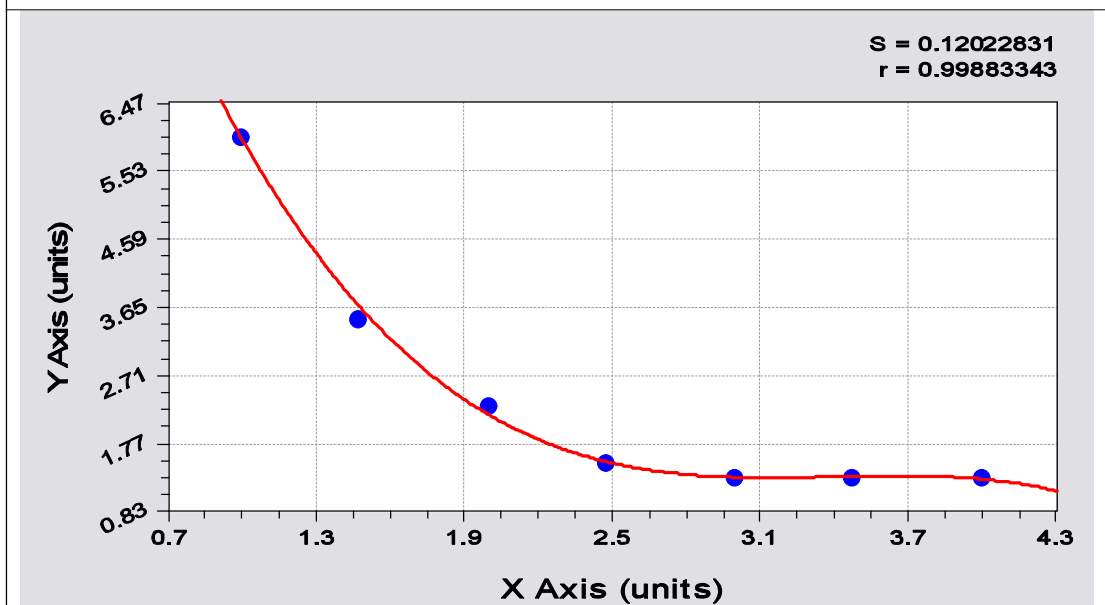
Fuente: McCabe. 2003. pág. 279, y M. Doran. 1998. pág. 157.

Anexo D.

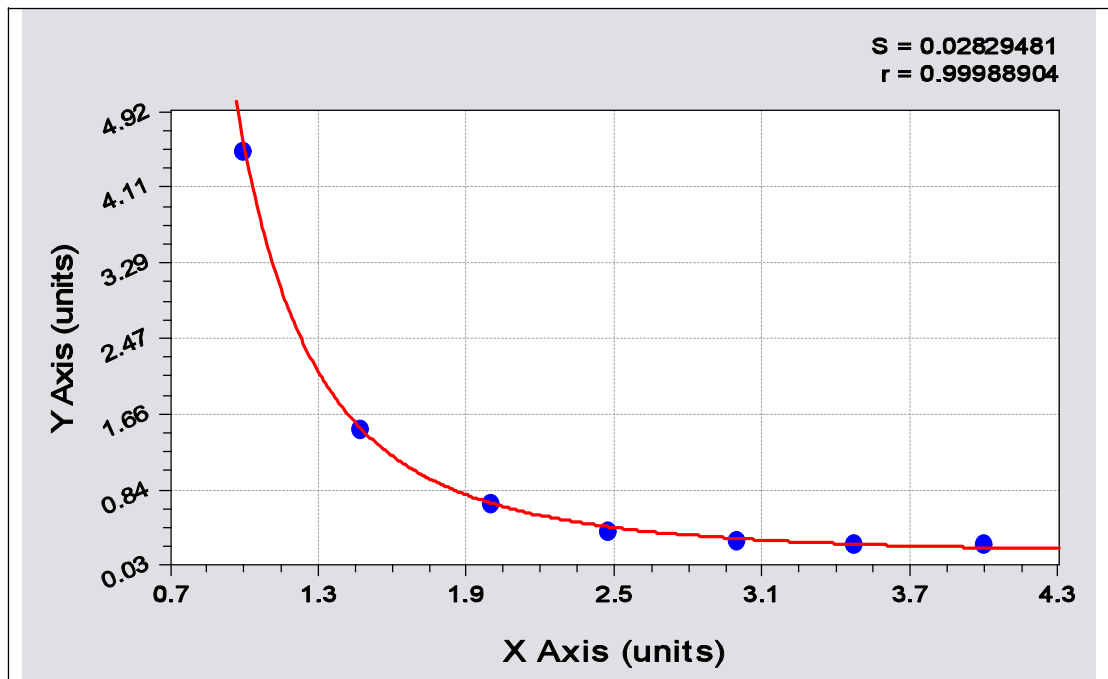
CURVAS DE LAS FUNCIONES OBTENIDAS A TRAVÉS DEL PROGRAMA CurveExpert 1.3.



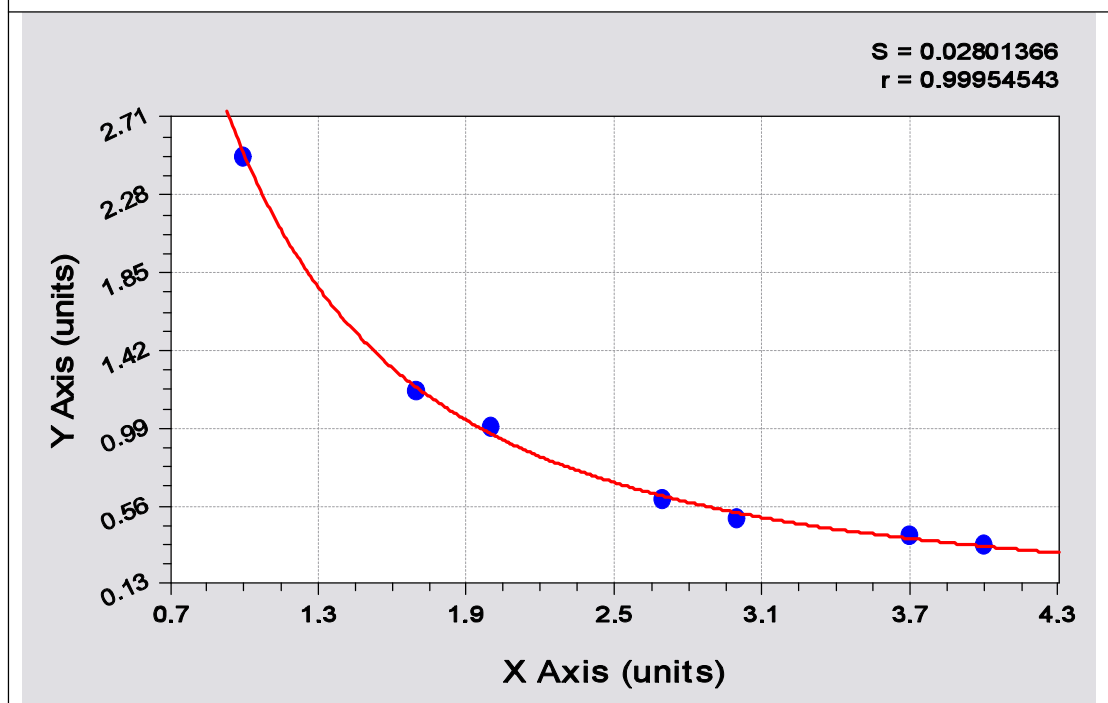
Función para turbina Rushton.



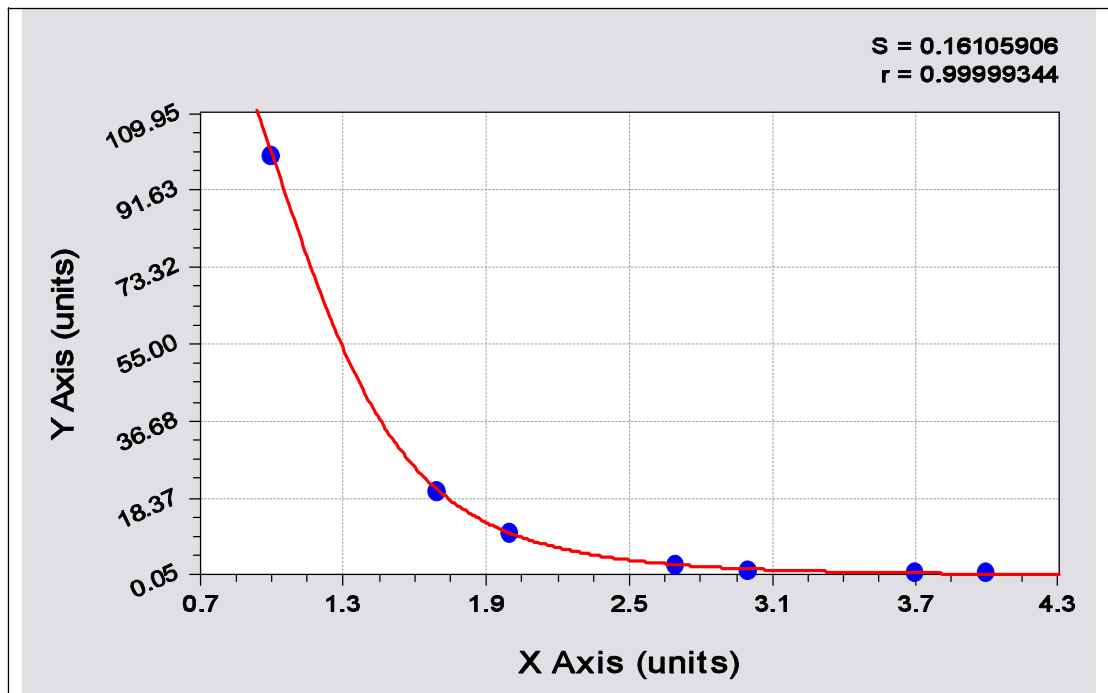
Función para turbina de palas inclinadas de 45°.



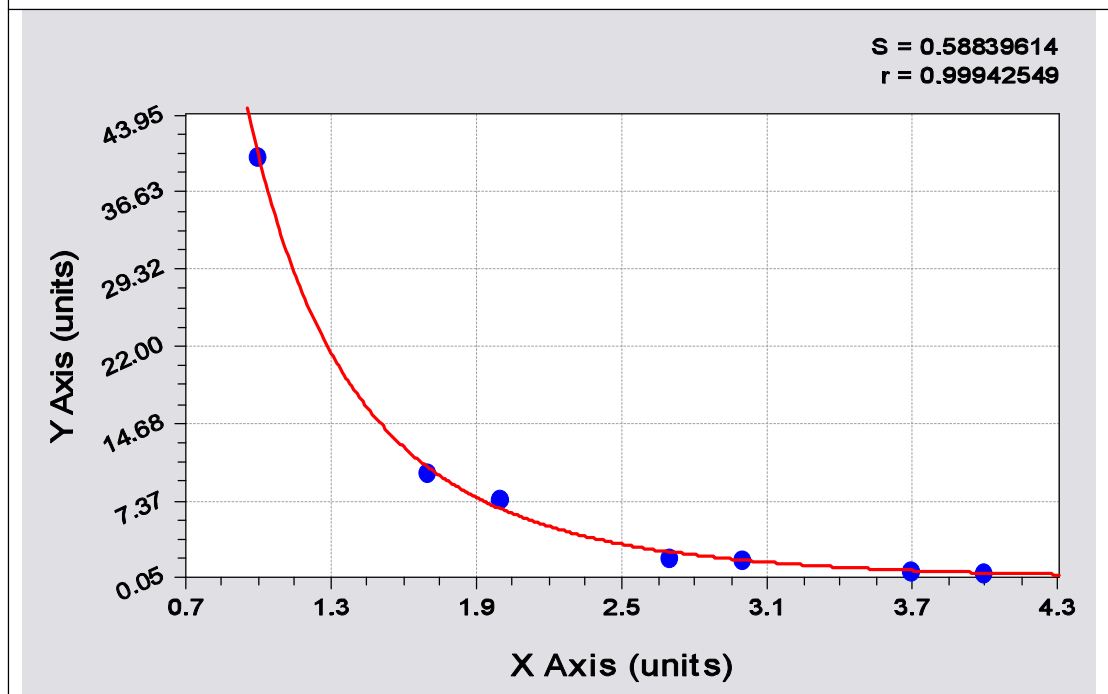
Función para impulsor HE-3.



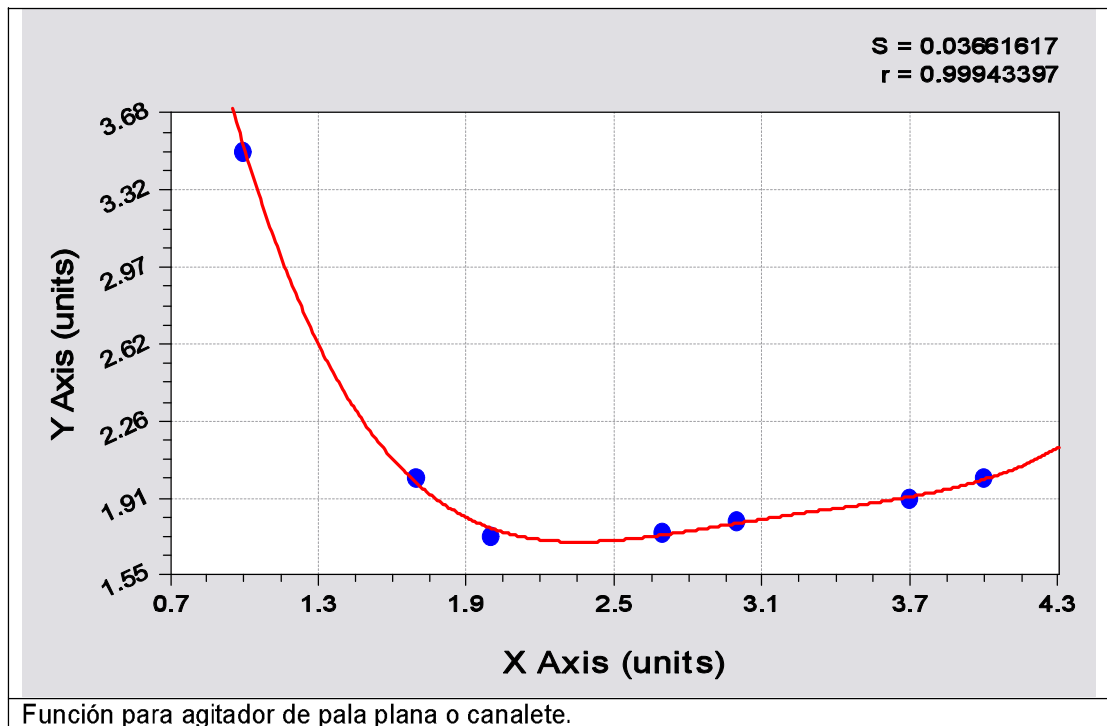
Función para hélice de paso cuadrado.



Función para cinta helicoidal de paso cuadrado.



Función para agitador de ancla o áncora.



Representación gráfica de las funciones de correlación de potencia obtenidas por CurveExpert 1.3, donde S es el error estándar, r es el coeficiente de correlación, Y es el número de Potencia y X es el logaritmo del número de Reynolds.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

BAKKER, Andre y Col. Effects of flow pattern on the solids distribution in a stirred tank. <http://www.bakker.org/cfm>. 2000. pág. 5 - 6.

BRODKEY, Robert S. Transport phenomena. Editorial McGraw-Hill. Singapore. 1988. pág. 375-380.

DE MIGUEL, Adoración; PIATTINI VELTIUS, Mario y MARCOS MARTÍNEZ, Esperanza. Diseño de bases de datos relacionales. Editorial Alfaomega. México D.F. 2000. pág. 298-301.

GEANKOPLIS, Christie J. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Editorial Secsa. México D.F. 1999. pág. 161-176.

GONZALEZ, Hilda. Diseño de algoritmos. Editorial UNAD. Bogotá. 2001. pág. 77-100.

M. DORAN, Pauline. Principios de ingeniería de los bioprocesos. Editorial Acirbia S.A. España. 1998. pág 155-169.

MARDEN. Elizabeth, BAKKER. André, Computational fluid mixing. <http://www.fluent.com>. Editorial Fluent Inc. Lebanon, New Hampshire, USA. 2003. pág. 5 – 29.

McCABE, Warren L. Operaciones unitarias en ingeniería química. 6ª edición. Editorial McGraw-Hill. México D.F. 2003. pág. 263-305.

M.C. VALIENTE. Antonio, Manual del ingeniero químico. Editorial Limusa S.A. México D.F. 1993. pág. 218-242.

SCENNA, J. Nicolás y col. Modelación, simulación y optimización de procesos químicos. [http:// www.modelandoeningeniería.com](http://www.modelandoeningeniería.com). Universidad Nacional del Litoral. Santa fe, Argentina. 1999. pág. 583-741.

SCRAGG, Alan. Biotecnología para ingenieros. Sistemas biológicos en procesos tecnológicos. Editorial Limusa S.A. México D.F. 2000. pág. 287-302.

STEFFE, James F. Rheological methods in process engineering. Editorial Freeman Press. Michigan State University, USA. 1996. pág. 358-370.

TREJO, Rubén. Sistema de adquisición de datos para ingeniería biomédica (guía de LabView). Sacramento. Universidad estatal de California. Facultad de ingenierías. 1997. pág. 6-7.