



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**HIDRODINÁMICA DE UN MEZCLADOR
PLANETARIO DOBLE**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

JORGE LUIS BAUTISTA BAUTISTA



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. GABRIEL ASCANIO GASCA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO 2016

CDMX



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

“Faad sehteio fresce en tora”

-Hirohara Yukiko-

*“No tengo claro cuál es la forma correcta de hacer las cosas.
Cualquiera simpatiza con la idea,
aparentemente fácil,
de hacerlas a tu manera,
sin hacer caso a nadie,
solo atendiendo a tus propias necesidades e impulsos.*

Parece sensato.

*Sin embargo,
cualquiera que haya realizado "a su manera",
un proyecto más o menos artístico o creativo,
sabrán de críticas feroces,
como si hubiera cometido sacrilegio,
o una herejía inaceptable”.*

-Enrique Bunbury-

*“El miedo no es algo malo,
te enseña tu debilidad
y una vez conoces tu debilidad,
puedes volverte más fuerte y amable”.*

-Gildarts-

Este trabajo se desarrolló en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la UNAM, en el laboratorio de Ingeniería de Proceso bajo la asesoría del Dr. Gabriel Ascanio.

Se agradece al M. en I. Miguel Angel Bazán Ramírez la asesoría técnica y desarrollo del sistema planetario doble.

Agradecimientos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por dejarme permanecer a esta gran institución, que por medio del CCH Oriente y de la Facultad de Ingeniería me dieron la formación para poder llegar a esta instancia.

Al Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), por dejarme utilizar sus instalaciones para la realización de este trabajo.

Al Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México, en especial al Taller de Electromecánica 1 del taller Zaragoza, por aceptarme en su programa de servicio social y todas las cosas que me enseñaron en mi estancia.

Al Dr. Gabriel Ascanio Gasca, por aceptarme en este proyecto y brindarme todo su apoyo en la realización del mismo, así como también por todos sus consejos y sus enseñanzas.

Un agradecimiento técnico a la Dra. María Soledad Córdova Aguilar, por la ayuda brindada en el uso del Reómetro y al M.I. Miguel Ángel Bazán Ramírez, por la ayuda en el diseño de algunos equipos utilizados en este trabajo, además de la amistad brindada por ambos.

Al taller del CCADET, sobre todo al Sr. Norberto, Barreto y Dani, quienes me ayudaron en todo momento en la utilización de algunos equipos y en la realización de piezas y ensambles de equipos necesarios en este proyecto.

Dedicatoria

Mamá y Papá, todo es gracias a ustedes, que sin su apoyo y consejos esto no hubiera podido llegar hasta a ser la persona que soy, todo se los debo a ustedes, no sé cómo pagárselo, solo sé que nunca me cansare de agradecerse. Gracias por todo.

Olga, tu esfuerzo y compromiso han sido un gran ejemplo, tu apoyo ha sido una parte importante en mi vida, eres la mejor hermana mayor que me pudo haber tocado.

Liliana, aunque hayas sido la hija no deseada, sabes que te quiero mucho, todas tus ocurrencias son muy divertidas, sigue adelante, sabes que tendrás todo mi apoyo.

Fernando, échale muchas ganas, tu puedes, mi apoyo y de toda nuestra familia siempre la tendrás, nunca te rindas, sigue adelante.

Abuelito Camacho, gracias por todo el apoyo que me brindaste y el amor que me has dado, aunque no seamos nada siempre serás mi abuelito.

Padrinos, Aurora y Máximo, su apoyo en todo lo que hago y sus consejos dados son parte importante en mi vida, son mis segundos padres, gracias por todo.

Elizabeth, Miriam, Rodrigo y Oswaldo, los mejores primos que se puede tener, todos los momentos que pasamos son muy divertidos, nunca cambien.

Ana, gracias por tu amistad de casi 13 años, que aunque casi no nos vemos, sé que siempre contare con tu apoyo, así como también sabes que tú cuentas conmigo, la distancia que hay entre nosotros es lo que menos importa.

Lalo, Jose, Rulo, Mogli, Jabón y Moy, gracias por lo momentos divertidos que pasamos juntos, todas las locuras que hemos hecho, su amistad son de las cosas que nunca quiero perder, son mis hermanos de otros padres.

Chelo, Chiva, Raulito y Tribu, o como nos decían “Los Warrios”, gracias por hacer más amena la estancia en la prepa, definitivamente su compañía en esos momentos fueron muy gratos, sigan por buen camino.

Padilla, Bubu, Aldair, Ivan, Tigrillo y Haro, gracias por su amistad brindada durante la carrera, son grandes ingenieros, espero triunfen en sus carreras.

Isaac, Jorge (Tocayo), Gerry, Ulises, Juan, Jenn, Aidee, Daniel, Donis, Miguel, Inés, Omar, Dulce, Nancy, Adrián y Dra. Marisol, gracias por la amistad y los consejos brindados desde mi llegada al CCADET, sin ustedes posiblemente mi estancia allí hubiera sido muy pesado. Que siga así el grupo de ingeniería de proceso.

Por último, quiero dedicar este trabajo a todas las personas que me han apoyado o aportado algo en lo académico o lo personal y que se me haya olvidado mencionar, soy humano y probablemente no los haya recordado.

Por mi familia, mis amigos y el mañana.

Índice

Nomenclatura	1
Lista de figuras	2
Lista de tablas	3
Resumen	4
1. Introducción	5
1.1 Mezclador	6
1.2 Grupos adimensionales.	8
1.3 Regímenes de flujo en impulsores	10
1.4 Tanque agitado	11
2. Objetivos	15
3. Metodología	16
3.1 Equipo	16
3.2 Fluidos de trabajo	17
3.3 Consumo de potencia	18
3.3.1 Análisis dimensional	21
3.4 Colorimetría	22
4. Resultados	24
4.1 Consumo de potencia	24
4.2 Tiempos de mezclado	24
4.3 Patrones de flujo	26
Conclusiones	29
Referencias	31
Anexo A	32
Anexo B	37

Nomenclatura

D	=	Diámetro característico
D_T	=	Diámetro del tanque
F_g	=	Fuerzas gravitatorias
F_I	=	Fuerzas inerciales
F_V	=	Fuerzas viscosas
g	=	Gravedad
H	=	Altura del Filete
M	=	Masa
N	=	Velocidad característica
N_{Fr}	=	Número de Froude
N_P	=	Número de Potencia
N_Q	=	Número de flujo
N_{Re}	=	Número de Reynolds
N_{We}	=	Número de Weber
P	=	Potencia
Q	=	Flujo volumétrico
r_A	=	Radio de giro del ancla con respecto al tanque agitado
$r_{A/B}$	=	Radio del ancla
r_B	=	Distancia del centro del tanque agitado a la periferia del ancla
T	=	Par de torsión
V	=	Volumen
Z	=	Profundidad de líquido estático
δ	=	Desfase existente entre el esfuerzo y la deformación
μ	=	Viscosidad dinámica
ρ	=	Densidad
σ	=	Esfuerzo cortante
ω	=	Velocidad angular
ω_A	=	Velocidad angular de transición
ω_B	=	Velocidad angular de rotación del ancla

Lista de figuras

Figura 1	Impulsores de flujo axial.....	7
Figura 2	Patrón típico del flujo axial.....	7
Figura 3	Impulsores de flujo radial	7
Figura 4	Patrón típico del flujo radial.....	7
Figura 5	Curvas típicas de N_P vs. N_{Re} para geometrías de referencia. (Oldshue et al, 1995)	10
Figura 6	N_P vs. N_{Re} para tres tipos diferentes de impulso. (Oldshue et al, 1995)	11
Figura 7	Filetes utilizados en suspensión de sólidos. (Oldshue et al, 1995)	13
Figura 8	Partes del mezclador planetario	16
Figura 9	Viscosidad de la glicerina a diferentes concentraciones	17
Figura 10	Arreglo impulsores en el mezclador planetario	19
Figura 11	Valores del arreglo del mezclador planetario.....	21
Figura 12	Curva de potencia de la glicerina en el mezclador planetario.....	24
Figura 13	$n_B\theta_m$ vs. N_{Re} de base a ácido del mezclador planetario.....	25
Figura 14	$n_B\theta_m$ vs N_{Re} de ácido a base del mezclador planetario.....	26
Figura 15	Base-ácido de la glicerina al 90% a 43rpm; a) Inicio de la mezcla; b) Mezcla en etapa intermedia; c) Mezcla a punto de terminar.....	27
Figura 16	Mezcla de glicerina al 85% de ácido a base a 30rpm a) Inicio de la mezcla, b) Comportamiento de una mezcla intermedia, c) Mezcla a punto de finalizar	28
Figura 17	Ventana inicial del programa SENSIT.....	32
Figura 18	Ventana que muestra la conexión del sensor	32
Figura 19	Verificación de la conexión del sensor	33
Figura 20	Ventana que muestra el display del sensor	33
Figura 21	Función Live Graphing Mode.....	34
Figura 22	Parámetros deseados	34
Figura 23	Gráfica en tiempo real hecha por el programa	36

Lista de tablas

Tabla 1	Viscosidad y densidad de la glicerina	18
Tabla 2	Valores de radios y velocidades (primer método).....	22
Tabla 3	Valores de radios y velocidades (segundo método)	22
Tabla 4	Tiempo de mezclado de base a ácido	25
Tabla 5	Tiempo de mezclado del mezclador planetario de ácido a base.....	26

Resumen

El mezclado es una de las operaciones unitarias más utilizadas a nivel industrial. El mezclado de fluidos viscosos se lleva a cabo en régimen laminar mediante agitadores de claro estrecho y en el caso de fluidos altamente viscosos o pastas, se utilizan mezcladores planetarios. En el presente trabajo se llevó a cabo un estudio sobre la hidrodinámica de un mezclador planetario doble utilizando fluidos Newtonianos. El sistema se caracterizó en función del consumo de potencia, el tiempo de mezclado y la visualización de los patrones de flujo por análisis de imágenes. Del análisis del consumo de potencia se encontró que el método de trayectoria proporciona datos más exactos al considerar promedio de valores máximos y mínimos de los radios y velocidades.

Por otra parte, los tiempos de mezclado disminuyen al incrementar la velocidad de rotación del eje principal y al disminuir la concentración de glicerina. Este tipo de mezclador, estimula un mezclado por etapas y genera algunos puntos de estancamiento, y por tanto, tiempos de mezclado muy altos. Esto implica que a una velocidad baja de agitación, con una viscosidad alta, la mezcla puede tardar algunos días en lograrse, mientras que a una viscosidad baja y una velocidad alta de agitación, el mezclado sea de segundos.

1. Introducción

Se puede definir al mezclado como una reducción de una inhomogeneidad (carencia de homogeneidad) con el fin de lograr un resultado en un proceso dado. La inhomogeneidad puede ser una concentración, fase o temperatura o dicho de otra forma, generar una homogeneidad dentro de una cantidad de materia con respecto a una variable determinada.

Por tanto:

- El principal objetivo del mezclado es lograr una homogeneidad respecto a una o varias variables de interés.
- Las variables de interés estarán determinadas por el proceso realizado así como, los requerimientos del mismo. Algunas de éstas pueden ser temperatura, concentración, densidad, tiempo etc.
- Los sistemas en los que se da el mezclado pueden involucrar los distintos estados de la materia, teniendo sistemas con dos fases miscibles (líquido-líquido, gas-gas o sólido-sólido) o varios; sólido-líquido, líquido-gas, sólido-gas etc. (Buerhend, 2010).

El mezclado y/o agitación de líquidos miscibles o de sólidos en líquidos se efectúa con el objeto de lograr una distribución uniforme de los componentes entre sí por medio del flujo. Dicho flujo se puede formar por medios mecánicos y generalmente cuando se mezclan líquidos miscibles o sólidos en líquidos se logra un mezclado íntimo, pero con líquidos inmiscibles y materiales muy viscosos o pastosos el grado de mezclado logrado es menor (Vernon, 2010).

La mezcla de fluidos juega un papel importante en el procesamiento de una multitud de productos. La mayoría de los productos de consumo e industriales requieren algún tipo de mezcla de fluidos en su preparación y aplicación. La mezcla de fluidos es, sin duda, la operación más común encontrada en el Industrias de Proceso Químico (IPC) e industrias afines. Los productos obtenidos a partir de los alimentos, el petróleo, la minería, la farmacéutica, las industrias de pulpa y papel y químicos no estarían disponibles si no fuera por un equipo de mezcla de líquidos y la tecnología de mezcla de líquidos. Además, los mezcladores de fluidos son esenciales para ayudar a proteger el ambiente. Por ejemplo, en

desulfuración de gases de combustión (FGD) - un proceso que ayuda a controlar la contaminación atmosférica (lluvia ácida) - mezcladores de fluidos desempeña un papel importante en la absorción de dióxido de azufre (Oldshue et al, 1995).

1.1 Mezclador

Un mezclador de fluido generalmente consiste en un mecanismo de accionamiento, un eje y uno o más impulsores montados sobre el eje. La rotación de los impulsores promueve un intercambio de materiales dentro del sistema con el fin de satisfacer un proceso requerido. También hay mezcladores “de tipo estático”, que tienen elementos de mezcla fijas y partes móviles. Estos normalmente se utilizan en tuberías de proceso donde la energía y el flujo son derivada de la corriente del proceso.

Hay diversos tipos de impulsores de mezcla, incluidas las hélices, turbinas rectas, turbinas curvas, de ancla, compuertas, paletas, turbinas de disco inclinado, etc. En general, los impulsores de mezcla se pueden asignar a dos grandes categorías, impulsores de flujo axial e impulsores flujo radial.

Los impulsores de flujo axial tienen una dirección principal de descarga que coincide con el eje de rotación del impulsor. La figura 1 muestra ejemplos de impulsores de flujo axial y la figura 2 ilustra el patrón típico de flujo del impulsor axial.

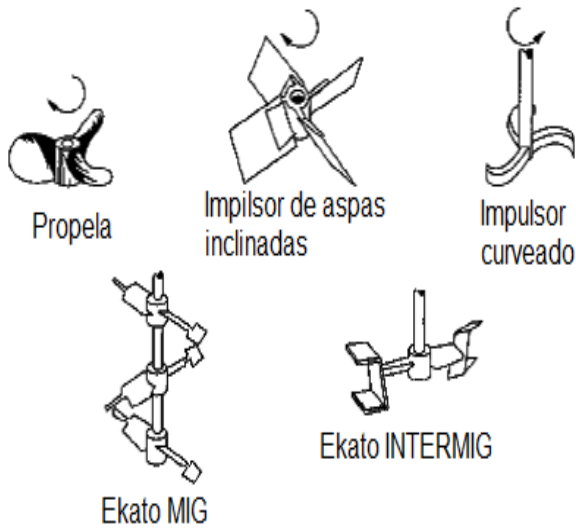


Figura 1 Impulsores de flujo axial

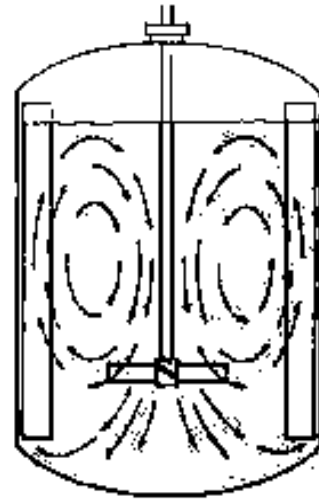


Figura 2 Patrón típico del flujo axial

Los impulsores de flujo radial tienen una dirección principal de descarga normal al eje de rotación. Las figuras 3 y 4 ilustran ejemplos de impulsores de flujo radial y sus patrones de flujo típicos (Oldshue et al, 1995).

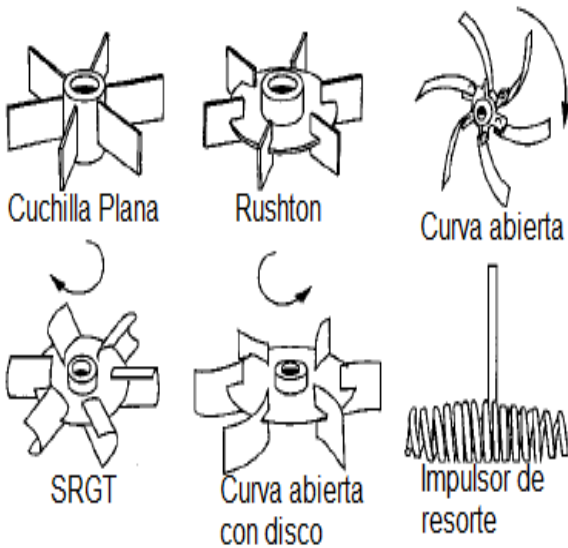


Figura 3 Impulsores de flujo radial

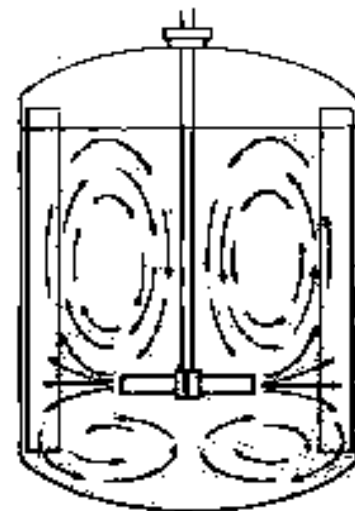


Figura 4 Patrón típico del flujo radial

Los impulsores de uso común para líquidos de baja viscosidad son el impulsor tipo hélice, que puede ser introducido en el tanque lateralmente por medio de una plataforma

móvil o puede montarse en la pared del tanque en posición desplazada del centro. Estos agitadores giran a velocidades de 400 a 1750 rpm.

Cuando se tienen materiales más viscosos tipo pastas de almidón, adhesivos, pinturas y cosméticos es conveniente el utilizar agitadores de paleta que giran a velocidades de 20 a 200 rpm. Los agitadores pueden contener de 2 a 4 paletas, la longitud total del propulsor de paletas mide 60-80% del diámetro del tanque y la anchura mide de 1/6 a 1/10 de la longitud.

Cuando se procesan líquidos con amplia variedad de viscosidades se usan turbinas, que tienen un diámetro de 30 a 60% el diámetro del tanque. Las aspas de la turbina pueden ser planas, inclinadas o curvas. Giran a una velocidad de 30-500 rpm. Generalmente están montados en un eje vertical y centrado en el tanque (Vernon, 2010).

1.2 Grupos adimensionales.

Durante los años de desarrollo de la mecánica de fluidos se han trabajado con números adimensionales de relevancia. Su significado físico permite tener una visión más clara de los fenómenos. Las variables que intervienen en los distintos fenómenos son la presión y la velocidad del flujo, la viscosidad, densidad y tensión superficial del fluido, aceleración de gravedad, la velocidad de propagación del sonido, etc. Dentro de las fuerzas que influyen en el flujo se encuentran las debidas a la inercia, viscosidad, presión, tensión superficial y compresibilidad. La razón entre cualquiera par de estas fuerzas genera grupos adimensionales (Gherardelli, 2007).

En la tecnología de mezcla de fluidos, relacionar fuerzas de inercia (la fuerza de entrada del mezclador) con otras fuerzas produce las siguientes relaciones:

1. La relación de la fuerza de inercia, F_I , a la fuerza viscosa, F_V , es el número de Reynolds, N_{Re} :

$$N_{Re} = \frac{F_I}{F_V} = \frac{ND^2\rho}{\mu} \quad (1)$$

8 Hidrodinámica de un mezclador planetario doble

2. La relación de la fuerza de inercia, F_I , a la fuerza gravitatoria, F_g , es el número de Froude, N_{Fr} :

$$N_{Fr} = \frac{F_I}{F_g} = \frac{N^2 D}{g} \quad (2)$$

3. La relación de la fuerza de inercia, F_I , a la fuerza de tensión superficial, F_σ , es el número de Weber, N_{We} :

$$N_{We} = \frac{F_I}{F_\sigma} = \frac{N^2 D^3 \rho}{\sigma} \quad (3)$$

Otros grupos adimensionales son el número de potencia, N_P , y el número de flujo, N_Q :

$$N_P = \frac{P}{N^3 D^5 \rho} \quad (4)$$

Relación de la fuerza aplicada a la masa por la aceleración.

$$N_Q = \frac{Q}{ND^3} \quad (5)$$

Donde Q = Capacidad de bombeo del impulsor primario (Oldshue et al, 1995).

La importancia de los números adimensionales se manifiesta en la extrapolación. Si dos reactores de tamaños diferentes son semejantes (en el sentido de la teoría de la semejanza) los correspondientes números adimensionales tienen el mismo valor para esos dos reactores, y la expresión que relaciona esos números entre sí es la misma. Esto significa que si un sistema dado se ha descrito a pequeña escala por una relación entre números adimensionales, la misma expresión matemática podrá aplicarse a un sistema semejante de tamaño superior.

Sin embargo, el cambio de escala puede ir acompañado por cambios en la estructura del flujo líquido, hecho que las relaciones empíricas establecidas no tienen en cuenta y entonces la extrapolación no es completamente correcta y sería ingenierilmente arriesgada (Coeuret, 1992).

1.3 Regímenes de flujo en impulsores

Los impulsores utilizados para mezclar operan en varios regímenes de flujo dependiendo del número de Reynolds de la mezcla. Para cada diseño de impulsor, N_P vs. N_{Re} , pueden generar los datos para producir una curva característica de cada diseño de impulsor en específico. Un ejemplo de esto, son las curvas típicas obtenidas que se muestran en la Figura 7.

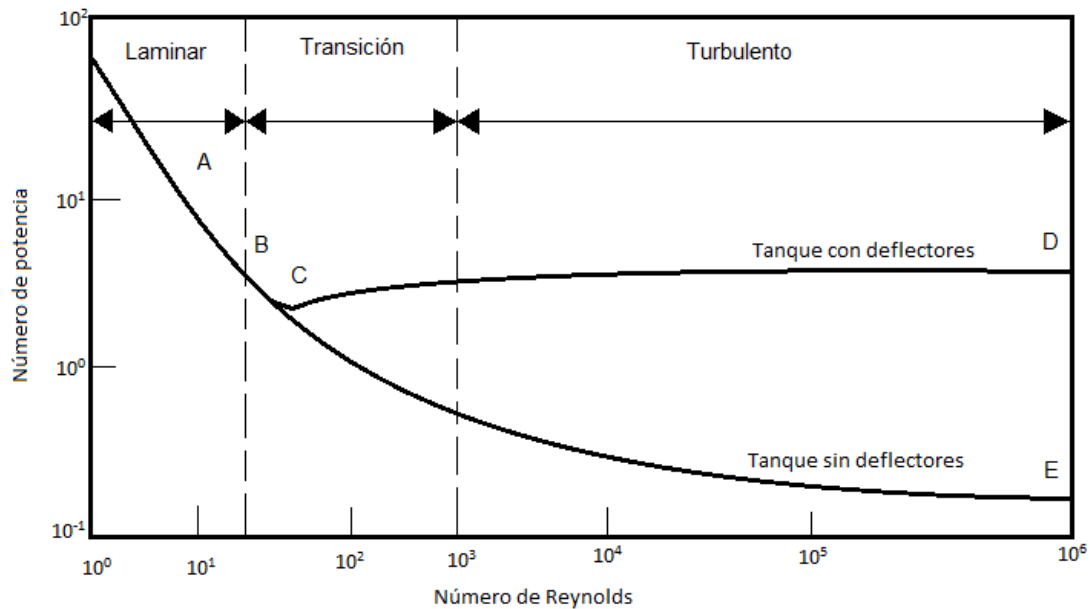


Figura 5 Curvas típicas de N_P vs. N_{Re} para geometrías de referencia. (Oldshue et al, 1995)

Tomando en cuenta que las curvas se dividen en tres distintos regímenes flujo laminar, de transición y turbulento. En la región laminar, el número de potencia varía inversamente con el número de Reynolds, en la región de transición, la pendiente varía de forma continua y en la región turbulenta (en un tanque con deflectores) la pendiente es constante (cero). Por lo tanto, el número de potencia también es constante en la región turbulenta.

Si se tienen tres diseños de impulsor completamente diferentes, se podrán generar tres curvas separadas, como se muestra en la figura 8.

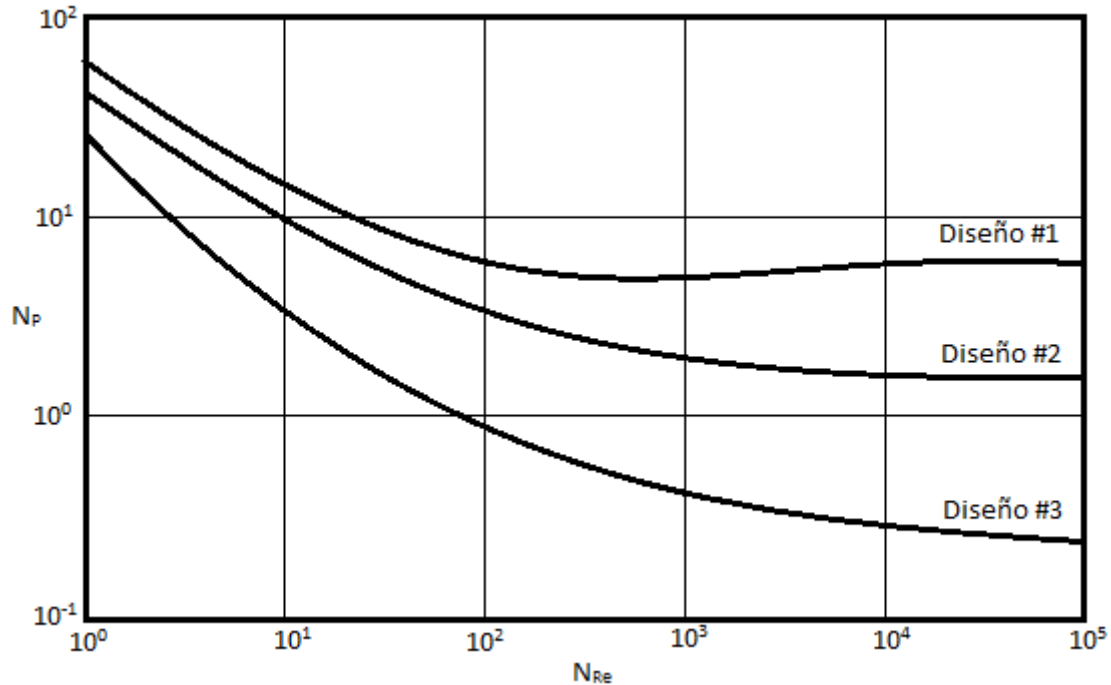


Figura 6 N_p vs. N_{Re} para tres tipos diferentes de impulso. (Oldshue et al, 1995)

Al comparar los números de potencia de los diferentes diseños de impulsor, el número de Reynolds debe mantenerse constante. Pero en el régimen turbulento N_p es constante para un diseño de impulsor a través de un gran rango de números de Reynolds. Esto a menudo es la base para la comparación (Oldshue et al, 1995).

1.4 Tanque agitado

Durante muchos años, el diseño de los tanques de agitación se ha realizado de forma empírica, tomando en cuenta aspectos como: la potencia requerida, el corte que se realiza en el fluido, el bombeo, el tiempo de mezclado y los patrones de flujo. La medición de estos parámetros se logra principalmente de manera experimental, utilizando modelos a escala en tanques de material transparente (principalmente de vidrio) que permite observar el comportamiento del fluido ante las diferentes condiciones de la agitación. Sin embargo, es bastante difícil lograr observar los patrones de flujo y determinar el grado de homogeneización y el tiempo de mezclado debido a la rapidez con que este sucede y a la dificultad de realizar las observaciones y mediciones experimentales.

Las modernas herramientas computacionales y las nuevas técnicas numéricas hacen posible la predicción de los patrones de flujo y la hidrodinámica en una gran variedad de aplicaciones utilizando las herramientas de CFD (Computacional Fluid Dynamics).

Dentro de las operaciones industriales se aprovechar la aplicación de esta tecnología. Un diseño adecuado es el que combina todos estos factores y métodos de una forma eficiente de acuerdo a la aplicación específica que se requiera (Uribe et al, 2012).

La geometría del tanque juega un papel muy importante en el diseño final del mezclador. En algunos casos, podría ser menos costoso a largo plazo comenzar con el diseño adecuado del tanque, en lugar de diseñar un mezclador en torno a un tanque de geometría fija.

En general, el mejor diseño de tanque resulta estar en un rango de Z/D_T de 1.0 a 1.2. Esto se refiere a la relación entre la profundidad del líquido estático, Z , y el diámetro del tanque, D_T . Este rango de Z/D_T permite una distribución óptima de la energía y la potencia de entrada en la mayoría de los casos. Sin embargo, si las condiciones indican otra relación de Z/T , el nivel mínimo normal de funcionamiento, Z , debería ser alrededor de un tercio del diámetro del tanque. Cuando $Z/D_T > 1.0-1.2$, será necesario generalmente múltiples impulsores de mezcla.

El fondo de un tanque deben ser o bien plana o cóncava pero fondos cónicos o esféricos también se pueden utilizar. Normalmente, se prefiere un tanque de plato de fondo, pero los tanques de fondo plano se pueden utilizar para muchos procesos sin ninguna dificultad. También hay que considerar el uso de un pequeño filete en el depósito de fondo plano, si estamos preocupados por la suspensión de sólidos en los recipientes grandes (Figura 9)

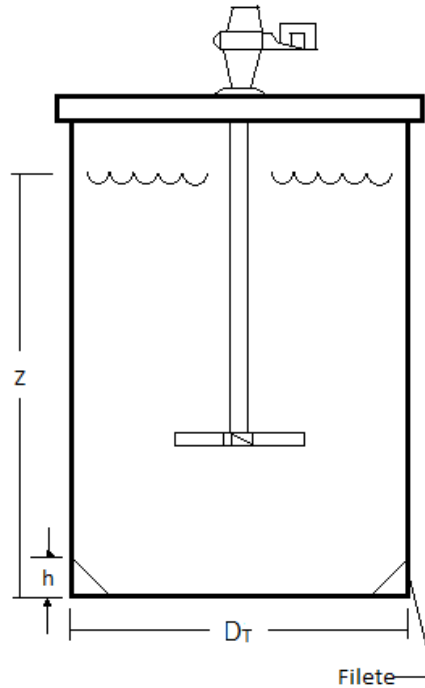


Figura 7 Filetes utilizados en suspensión de sólidos. (Oldshue et al, 1995)

La hidrodinámica de mezcladores planetarios se ha investigado durante varios años, siendo las simulaciones numéricas las más usadas. Tanguy y colaboradores (Tanguy et al, 1999), trabajaron con la simulación de un mezclador planetario doble usando una reacción de reticulación; su simulación despreciaba los esfuerzos cortantes por lo que sus simulaciones no predecían bien.

También existen varios análisis adimensionales, Delaplace y colaboradores (Delaplace et al, 2005), comprueban que los número de potencia y Reynolds son excelentes para comparar el consumo de potencia de un mezclador de este tipo con un mezclador convencional. Delaplace introdujo el tiempo de mezclado, (Delaplace et al, 2007), para hacer una comparación de que tan eficiente es el mezclado de fluidos viscosos de este tipo de mezcladores con uno convencional. El análisis de Andre y colaboradores, (Andre et al, 2012), propone generalizar algunos números adimensionales, que sustituyan números ya conocidos como el tiempo de mezclado y la potencia, utilizados para la descripción de mezcladores convencionales.

Hay estudios de consumo de potencia con fluidos no newtonianos o materiales viscoelásticos, como el de Zhou y colaboradores (Zhou et al, 2000). Chesterton y colaboradores hicieron caracterizaciones reológicas de los efectos viscoso y elásticos generados por un mezclador planetario, (Chesterton et al, 2011), con fluidos newtonianos se hizo el análisis hidrodinámico de un mezclador planetario simple, Clifford (Clifford et al, 2004), estudió el efecto que tiene el número de Reynolds.

2. Objetivos

Objetivo General

Estudio de la hidrodinámica de un mezclador planetario doble.

Objetivos particulares

- 1.- Evaluar la hidrodinámica de un mezclador planetario doble con fluidos newtonianos
- 2.- Caracterización del consumo de potencia,
- 3.- Evaluar los tiempos de mezclado y patrones de flujo asociados al mezclado.

3. Metodología

3.1 Equipo

La figura 8 muestra el equipo de mezclado utilizado en el presente trabajo, el cual consta principalmente de un motorreductor $\frac{1}{4}$ HP, 42 RPM, 90 VCD 2424P marca Baldor-Reliance con un peso aproximado de 6.35 kg, conectado a un sensor de par de torsión marca Futek modelo TRS300 tipo FRH01987 con una capacidad de 10 N·m, fuerza axial máxima de 150 N, fuerza radial máxima de 20 N, y un peso de 0.5 kg, siguiéndole los dos agitadores tipo ancla de 177.8 mm x 55.8 mm, teniendo una relación de velocidades entre el motorreductor y los agitadores en de 5/3.

El tanque de mezclado es un cilindro de diámetro 195 mm y 232 mm de altura, el cual se encuentra dentro de una camisa cuadrada de 224 mm x 224 mm y una altura de 253 mm. Esta camisa contiene el mismo fluido de trabajo, con lo cual se minimizan los cambios de índice de refracción. El tanque se apoya de un sistema mecánico, el cual lo eleva hasta llegar a una altura apropiada para hacer las pruebas.

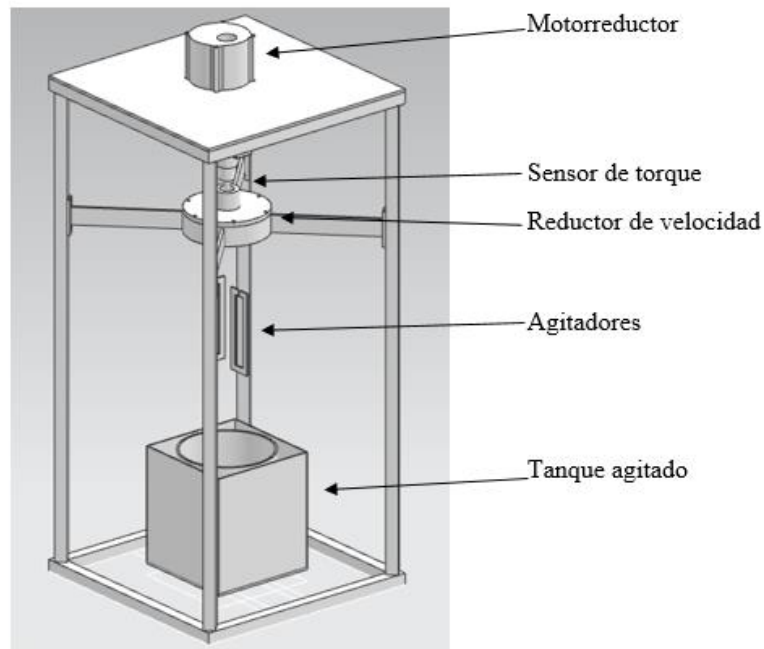


Figura 8 Partes del mezclador planetario

3.2 Fluidos de trabajo

Se hicieron pruebas con polietilenglicol (PEG), por ser un fluido newtoniano con un comportamiento muy viscoso, pero en pruebas preliminares se dieron ciertas situaciones que perjudicarían en algunas de las pruebas a realizarse.

Por lo tanto se utilizó glicerina a distintas concentraciones con agua, en peso. En la tabla 1 se presentan los datos de viscosidad y densidad de las distintas concentraciones de glicerina-agua con las que se caracterizó el mezclador planetario doble y en la figura 9 se muestra el comportamiento newtoniano a distintas tasas de deformación.

Figura 9 Viscosidad de la glicerina a diferentes concentraciones

	μ [Pa·s]	ρ [kg/m ³]
Glicerina 100%	0.777125	1259.46667
Glicerina 95%	0.323375	1250.6
Glicerina 90%	0.162125	1240.73333
Glicerina 85%	0.084125	1225.26667
Glicerina 80%	0.049475	1206.8

Tabla 1 Viscosidad y densidad de la glicerina

3.3 Consumo de potencia

La prueba de consumo de potencia, consistió en medir el par de torsión con un sensor de rotario de eje a eje, de acero inoxidable, con capacidad de 10 N·M (FUTEK, TRS300) a diferentes velocidades de rotación. los datos de par de torsión generados se obtuvieron con el programa SENSIT[®] (Anexo A), . Con un tacómetro digital se registró la velocidad a la cual gira el eje principal del mezclador. Con ambos valores se calculó la potencia con la siguiente ecuación.

$$P = T\omega \quad (8)$$

donde

T = Par de torsión consumido por los agitadores (N·m)

ω = velocidad de los agitadores (rad/s)

P = potencia consumida por los agitadores (Watts)

Con los valores de potencia, viscosidad y densidad se calcularon los números de potencia y Reynolds y se construyó la curva de potencia.

$$N_p = \frac{P}{\rho n^3 d^5} = \frac{P}{32\rho n^3 r^5} \quad (9)$$

$$N_{Re} = \frac{d^2 n \rho}{\mu} = \frac{4r^2 n \rho}{\mu} \quad (10)$$

donde:

d = diámetro característico de los agitadores (m)

n = velocidad característica de los agitadores (rps)

r = radio característico de los agitadores (m)

ρ = densidad de la mezcla (kg/m^3)

μ = viscosidad dinámica de la mezcla (Pa·s)

P = potencia consumida por los agitadores (Watts)

Debido a que cada agitador tiene movimiento de rotación alrededor de su eje (rotación pura) y alrededor del centro del tanque agitado (traslación), fue necesario determinar una velocidad de rotación equivalente para el cálculo de números adimensionales. Para tal caso, se realizaron dos análisis basados en el movimiento relativo, como se muestra en la figura 10.

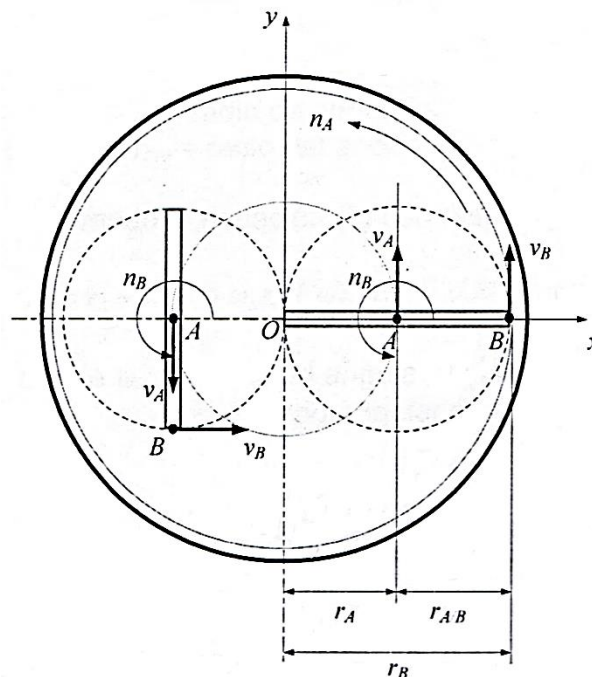


Figura 10 Arreglo impulsores en el mezclador planetario

El primer método que se usó fue tomando la posición y la velocidad de un punto en un instante del movimiento de los impulsores, en este caso usaremos el punto B, la posición se determinó con la siguiente expresión:

$$r_B = r_A + r_{A/B} \quad (11)$$

donde

r_B = distancia del centro del tanque agitado a la periferia del ancla

r_A = radio de giro del ancla con respecto al tanque agitado

$r_{A/B}$ = radio del ancla

Derivando esta ecuación con respecto al tiempo se obtuvo la velocidad del punto B.

$$v_B = v_A + v_{A/B} = \omega_A r_A + \omega_{A/B} r_{A/B} \quad (12)$$

Donde

ω_A = velocidad angular de transición = $2\pi n_A$

$\omega_{A/B}$ = velocidad angular de rotación del ancla = $2\pi n_{A/B}$

$v_B = 2\pi n_B$

Despejando n_B de la ecuación anterior se determinó la ecuación equivalente a emplear en los números de potencia y Reynolds.

$$n_B = \frac{n_A r_A + n_{A/B} r_{A/B}}{r_B} \quad (13)$$

Con las ecuaciones (11) y (13) se obtuvieron el radio característico y la velocidad característica del mezclador, además con estos valores se calcularon los números de potencia y de Reynolds.

20 Hidrodinámica de un mezclador planetario doble

Para el segundo método se utilizó un programa computacional que hiciera operaciones matemáticas y graficara, en este trabajo se optó por usar Wolfram Mathematica, con este programa se graficó la ecuación (11), para ver si la trayectoria del punto B era la misma que la del equipo.

Después se derivó esta ecuación en el programa para obtener la velocidad, sacando el máximo y el mínimo de cada una de las dos ecuaciones para que con estos dos valores se haga un promedio de todo un recorrido que hace el mezclador, por consecuencia se tendrá un valor que lleva a casi todas las posiciones que un punto puede recorrer y con ello poder elegir un mejor radio y velocidad.

3.3.1 Análisis dimensional

Se utilizaron dos métodos para el cálculo de los números de potencia y Reynolds.

En el primer método, se midió el valor del radio que se utilizó y se fue variando la velocidad del rotor. En la figura 11 se muestran las dimensiones del arreglo entre los agitadores y el tanque agitado mientras que en la tabla 2 se muestran los valores de los radios y velocidades utilizados.

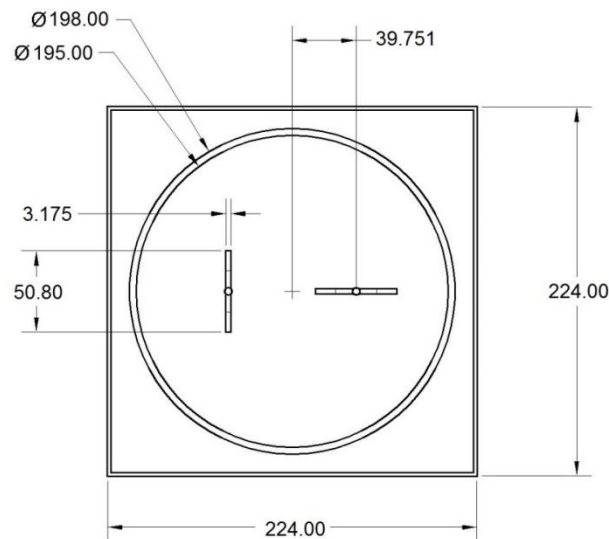


Figura 11 Valores del arreglo del mezclador planetario

n_A [rps]	r_A [m]	$n_{A/B}$ [rps]	$r_{A/B}$ [m]	r_B [m]	n_B [rps]
0.100	0.039	0.167	0.025	0.065	0.126
0.233	0.039	0.389	0.025	0.065	0.294
0.400	0.039	0.667	0.025	0.065	0.504
0.567	0.039	0.944	0.025	0.065	0.714
0.717	0.039	1.194	0.025	0.065	0.903

Tabla 2 Valores de radios y velocidades (primer método)

Para el segundo método, se utilizó la trayectoria que sigue el punto B, de uno de los impulsores del mezclador a través de un programa para graficar. Se obtuvieron los valores máximo y el mínimo de los radios. Al derivar la ecuación de la trayectoria se obtuvieron las velocidades: máxima y mínima que se muestran en la tabla 3.

v_B [m/s]	r_B [m]	n_B [rps]
0.033	0.0439	0.119
0.076	0.0437	0.278
0.132	0.0439	0.477
0.187	0.0440	0.676
0.236	0.0440	0.855

Tabla 3 Valores de radios y velocidades (segundo método)

3.4 Colorimetría

Con el método de colorimetría se observó el comportamiento de algunos fluidos dentro del tanque agitado. Se cubrieron tres lados del mezclador con láminas lisas de PVC espumado (trovicel) color negro, para evitar que luz externa modificara las condiciones de iluminación al tomar los videos. Enfrente del tanque se colocó una cámara que se cubrió con una tela de color oscuro para controlar la iluminación. En el lado opuesto a la cámara se colocó un panel de luz blanca a la altura en la que está situado el tanque de mezclado..

Para disminuir el índice de refracción y las sombras que se generen por el panel de luz blanca, se llenó la camisa del tanque con el mismo fluido de trabajo.. Por otra parte, se

calculó la porción molar de las soluciones de ácido (HCL 1N) y base (NaOH 1N) que se requirieron (Anexo B) para las pruebas de colorimetría y análisis de imágenes.

El método consistió en lo siguiente:

a) agregar 40 ml de verde de bromocresol, indicador orgánico (Hycel, Reactivos Químicos) en la parte superior del tanque ,.

b) Se pone a funcionar el mezclador y determina el tiempo que le lleva a la solución cambiar de color, de transparente a azul.

c) Se detiene el mezclador, para agregar 30ml de ácido clorhídrico (HCl 1N), en la misma posición que se agregó el colorante.

d) Se encendió el mezclador a la misma velocidad de agitación y determina el tiempo de cambio a color amarillo.

e) Se detiene el mezclador y se añaden 40 ml de hidróxido de sodio (NaOH 1N) en la misma posición que los reactivos anteriores.

f) Se hace funcionar el mezclador a la misma velocidad y se determina el tiempo que tarda en cambiar al color azul nuevamente.

g) Se aumenta la velocidad del mezclador y se repiten los pasos donde se agregaron el ácido y la base, registrando los tiempos de los cambios de color.

h) Se tomaron imágenes del proceso con una cámara (Cannon, EOS Rebel T3i), para cada experimento.

4. Resultados

4.1 Consumo de potencia

En la figura 12 se muestran las curvas de potencia obtenidos con los dos métodos propuestos para el análisis dimensional. Se observó que los dos métodos presentan el mismo comportamiento, manteniéndose en un régimen laminar.

Figura 12 Curva de potencia de la glicerina en el mezclador planetario

4.2 Tiempos de mezclado

Los tiempos de mezclado se obtuvieron a partir de la prueba de colorimetría. En la tabla 4 se presentan los resultados de los tiempo de mezclado obtenidos de base a ácido. Los valores disminuyen al incrementar la velocidad de rotación y al disminuir la concentración de glicerina.

	Glicerina	Glicerina 90%	Glicerina 80%
n_A [rps]	θ_m [s]	θ_m [s]	θ_m [s]
0.333	16673	2070	408
0.5	2465	800	175
0.716	1149	199	39

Tabla 4 Tiempo de mezclado de base a ácido

En la figura 13 se muestra la curva del número de Reynolds y el producto de la velocidad característica por el tiempo de mezclado, utilizando los mismos dos escenarios de la prueba de consumo de potencia.

Figura 13 $n_B\theta_m$ vs. N_{Re} de base a ácido del mezclador planetario

La línea de tendencia nos da el tiempo con el cual se puede lograr homogeneidad a diferentes números de Reynolds.

En la tabla 5, se muestran los tiempos de mezclado obtenidos cuando el cambio es de ácido a base.

	Glicerina	Glicerina 90%	Glicerina 80%
n_A [rps]	θ_m [s]	θ_m [s]	θ_m [s]
0.333	36680	4060	517
0.5	3212	290	94
0.716	2384	164	224

Tabla 5 Tiempo de mezclado del mezclador planetario de ácido a base

En la figura 14 se muestra el comportamiento y la línea de tendencia.

Figura 14 $n_B\theta_m$ vs N_{Re} de ácido a base del mezclador planetario

4.3 Patrones de flujo

De análisis de imágenes de los procesos, se desprende que el mezclado se realiza por etapas: primero se empieza a mezclar la parte superior del tanque y posteriormente, la parte de abajo.

En la figura 15 se observa el cambio de base a ácido en glicerina 90% y 43 rpm: Se observan tres etapas distintas: a) inicio del mezclado con el cual se aprecian algunas líneas de colorante en la parte superior del tanque hay acumulación del reactivo en la parte central y los agitadores los llevan a la orilla. Este efecto se observa mejor en la imagen del inciso b), donde el mezclado está en un punto intermedio, en el cual una mitad del tanque está relativamente mezclado mientras que en la imagen del inciso c) se observa un color verde en la parte centro-inferior del tanque, el mezclado es casi total no obstante que esta es la que tarda más en homogenizarse.

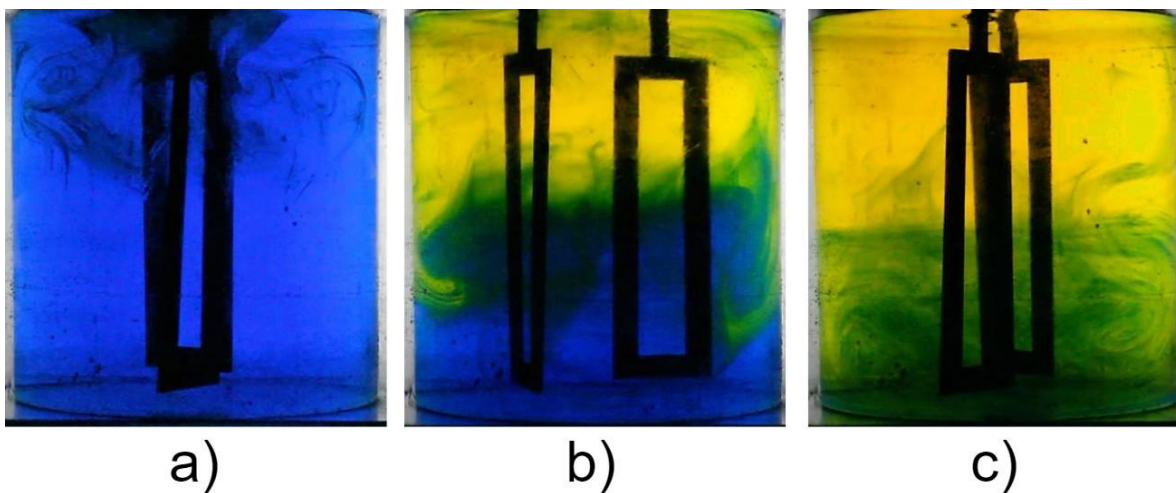


Figura 15 Base-ácido de la glicerina al 90% a 43rpm; a) Inicio de la mezcla; b) Mezcla en etapa intermedia; c) Mezcla a punto de terminar

El cambio de ácido a base presenta el mismo comportamiento, como se ve en la figura 16. Donde se muestran las tres etapas de homogenización en glicerina al 85%, donde al igual que en el cambio de base a ácido. Modificando la concentración de glicerina y la velocidad de rotación del eje central no causa ninguna diferencia en el patrón de flujo observado en las figuras 15 y 16.

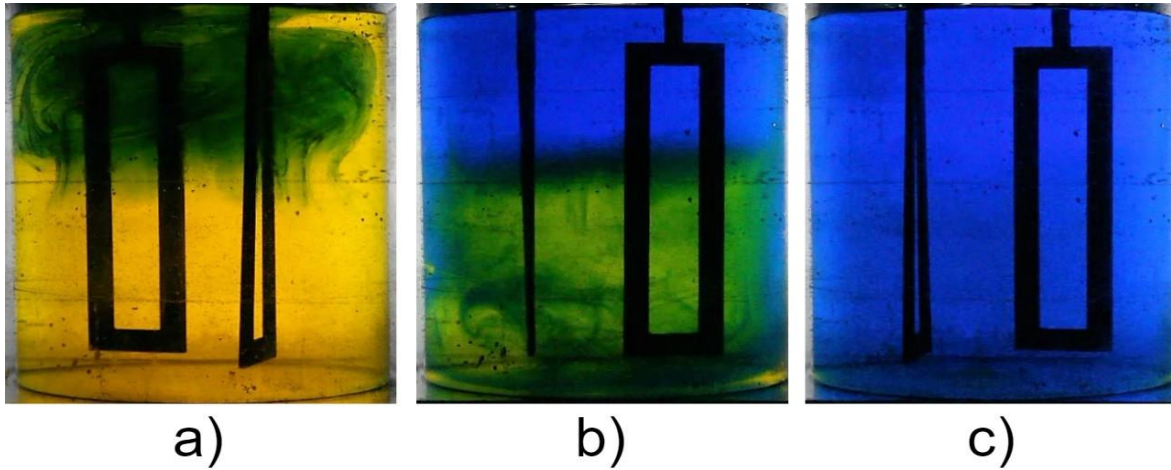


Figura 16 Mezcla de glicerina al 85% de ácido a base a 30rpm a) Inicio de la mezcla, b) Comportamiento de una mezcla intermedia, c) Mezcla a punto de finalizar

Es importante mencionar que dentro de estos puntos de estancamiento, el que más tiempo lleva en homogenizarse es el que se encuentra en la parte central del fondo del tanque, por ende algunos de los tiempos de mezclado fueron muy elevados (ej.: inciso c), figura 21). Una velocidad baja con una viscosidad alta, la mezcla puede tardar algunos días, mientras que a una viscosidad baja con una velocidad alta, la mezcla es de segundos.

Conclusiones

En este trabajo se estudió la hidrodinámica de un mezclador planetario doble en términos del consumo de potencia, tiempos de mezclado y los patrones de flujo que se observaron en el régimen laminar.

Se utilizaron dos métodos para el análisis del consumo de potencia, de los cuales se encontró que aunque no está definido una forma oficial de hacer los cálculos de los valores característicos, al relacionarlos con los números adimensionales que deben encontrarse en el régimen laminar, los valores del método de trayectoria proporciona datos más exactos, sobre todo porque se maneja un promedio entre el valor máximo y mínimo de los radios y velocidades.

Respecto a los patrones de flujo, este tipo de mezclador, comienza trasladando del centro hacia las orillas y la recirculación de los flujos estimula un mezclado por etapas y algunos puntos de estancamiento, siendo los principales, en la orilla superior e inferior del tanque y en la parte central del fondo del tanque.

Algunos de los puntos de estancamiento ocasionan tiempos de mezclado muy altos. Estos tiempos son función de la velocidad de rotación y de la viscosidad del fluido.

Para una mejor caracterización se podrían realizar más cosas, por ejemplo, es conveniente utilizar una forma de adicionar el colorante, el ácido y la sosa que garantice en el mismo punto del tanque.

Modificar el diseño y construcción del tanque de agitación para evitar los puntos de estancamiento y lograr un mezclado más rápido.

Colocar una cámara arriba y/o abajo del tanque que permita observar desde otro eje la forma en que el mezclado se realiza, teniendo en cuenta una buena iluminación.

Se recomienda utilizar otras técnicas como la velocimetría inducida por partículas (PIV por sus siglas en inglés) para analizar con detalle los patrones y estructuras del flujo que se

generan en este tipo de mezcladores planetarios. Asimismo, utilizar la técnica de fluorescencia inducida por láser (LIF por sus siglas en inglés), para analizar la evolución del proceso de mezclado en función de los patrones de concentración.

Referencias

- Andre, C., Demeyre, J.F., Gatamel, C., Berthiaux, H. y Delaplace, G., (2012), Dimensional analysis of a planetary mixer for homogenizing of free flowing powders: Mixing time and power consumption, *Chemical Engineering Journal*, 198-199, (2012), 371-378.
- Buerhend, R., (2010), Estudio de velocidades y arrastre de sólidos en presas de mezclado de lodos de perforación, T. Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chesterton, A.K.S., Meza, B.E., Moggridge, G.D., Sadd, P.A. y Wilson, D.I., (2011), Rheological characterisation of cake batters generated by planetary mixing: Elastic versus viscous effects, *Journal of Food Engineering*, 105, (2011), 332-342.
- Clifford, M.J., Cox, S.M. y Finn, M.D., (2004), Reynolds number effects in a simple planetary mixer, *Chemical Engineering Journal*, 59, (2004), 3371-3379.
- Coetret, F., (1992), Introducción a la ingeniería electroquímica, Reverte, España, 48-49.
- Delaplace, G., Guérin, R., y Leuliet, J.C., (2005), Dimensional Analysis for Planetary Mixer: Modified Power and Reynolds Numbers, *AIChE Journal*, Vol. 51 No 12, (2005), 3094-3100.
- Delaplace, G., Thakur, R.K., Bouvier, L., André, C. y Torrez, C., (2007), Dimensional analysis for planetary mixer: Mixing time and Reynolds numbers, *Chemical Engineering Journal*, 62, (2007), 1442-1447.
- Gherrardelli, C., (2007), Introducción a la Mecánica de Fluidos, U. de Chile, Chile, 93.
- Letelier-Manns, R. (2013). Operaciones unitarias sobre la mezcla de fluidos. Noviembre 16, 2015, de Universidad Arturo Prat Sitio web:
<http://es.slideshare.net/Klaramau/mezcla-de-fluidos>
- Oldshue, J., Herbst, N., y Post, T., (1995). A Guide to Fluid Mixing, *LIGHTNIN*, U.S.A., 2-3: 11-15: 26-27.
- Tanguy, P.A., Thibault, F., Dubois, C. y Ait-Kadi, A., (1999), Mixing Hydrodynamics in a Double Planetary Mixer, *Trans IChemE*, Vol 77, Part A, (1999), 318-324.
- Uribe, A., Rivera, R., Aguilera, A., y Murrieta, E., (2012), Agitación y Mezclado, *Revista Enlace Químico*, Vol. 4 No 1, (2012), 23.
- Vernor, J. (2005). Agitación y mezclado de líquidos en tanques. Noviembre 11, 2015, de Universidad Autónoma Metropolitana Sitio web:
<http://cbi.izt.uam.mx/iq/Laboratorio%20de%20Operaciones%20Unitarias/Practicas%20Laboratorios/PRACTICA1.pdf>
- Zhou, G., Tanguy, P.A. y Dubois, C., (2000), Power Consumption in a Double Planetary Mixer with non-Newtonian and Viscoelastic Materials, *Trans IChemE*, Vol 78, Part A, (2000), 445-453.

Anexo A

SENSIT Test and Measurement Software fue el software usado para una mejor medición del valor del par de torsión, se puede descargar libremente en la página de Futek.

Al abrir el programa lo primero que te pide es la licencia en la figura 17 se muestra la ventana que se abrirá, si es que se tiene la licencia se pone en los recuadros y dar click al botón de *Submit*, en caso contrario apretar el botón *Trial Version*.

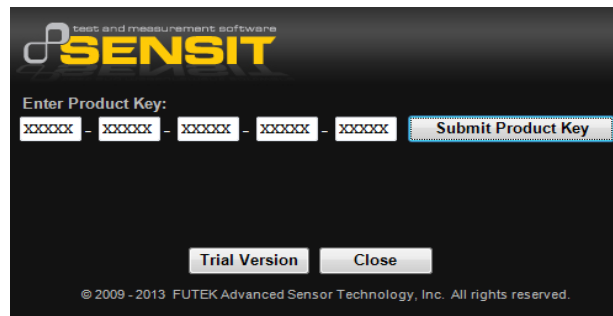


Figura 17 Ventana inicial del programa SENSIT

Enseguida empezara a cargar el programa, al terminarse de cargar aparecerá otra ventana donde aparecerá cuantos sensores están conectados, si es que encuentra un sensor conectado aparecerá la fila de *status* en una de las columnas con la palabra *Enabled* seguido por el número de serie del sensor, en caso contrario aparecerá *Disabled*, hay que aclarar que el sensor ya debe estar conectado porque si no hay que reiniciar el programa.

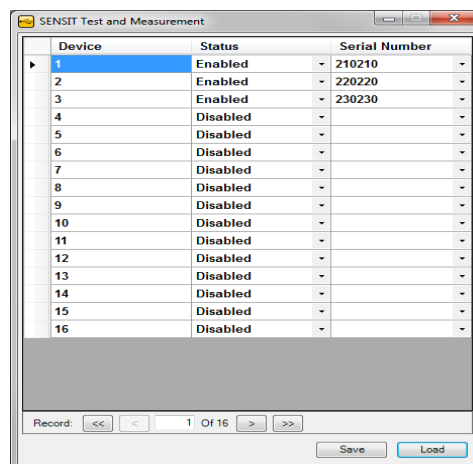
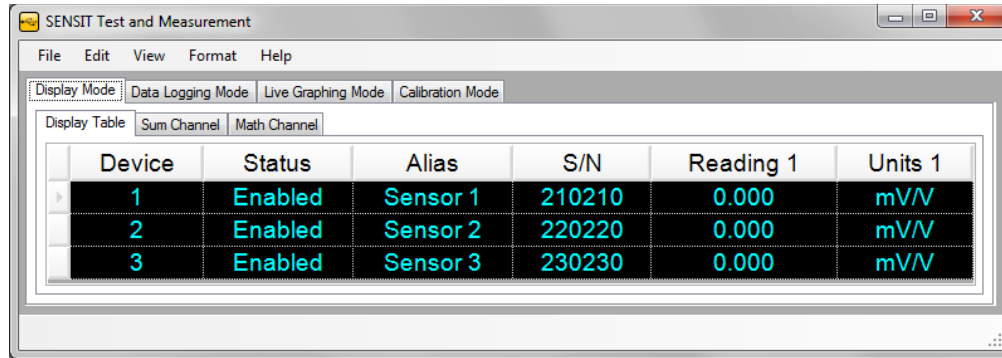


Figura 18 Ventana que muestra la conexión del sensor

Una vez asegurados que la ventana de la figura 18 detecte un sensor presionar el botón Load, el cual nos llevara directamente a la ventana de la figura 19, en la cual nos volverá a verificar el estado del sensor y algunas de sus características.



Device	Status	Alias	S/N	Reading 1	Units 1
1	Enabled	Sensor 1	210210	0.000	mV/V
2	Enabled	Sensor 2	220220	0.000	mV/V
3	Enabled	Sensor 3	230230	0.000	mV/V

Figura 19 Verificación de la conexión del sensor

Desde la pestaña de *Display Mode* > *Display Front Panel* se podrá manejar el sensor sin tener que apretar directamente los botones del panel en donde el botón importante es el *Tare/Gross*, porque con este botón podemos tarar la lectura y obtener datos sin tener que restar un valor inicial.

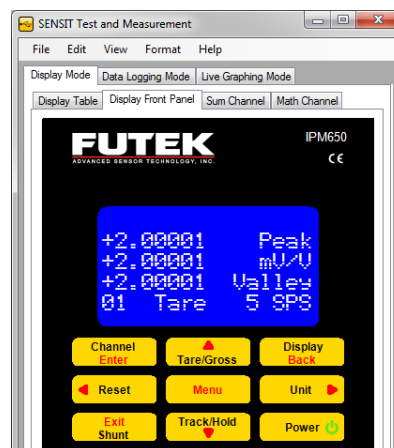


Figura 20 Ventana que muestra el display del sensor

La función que más nos interesa de este programa es la de Live Graphing Mode, la cual consiste en tabular y graficar los datos que el sensor este obteniendo y usarlos para beneficio propio, pues al ser un sensor con una sensibilidad baja los valores chicos tienden a cambiar muy rápidamente.

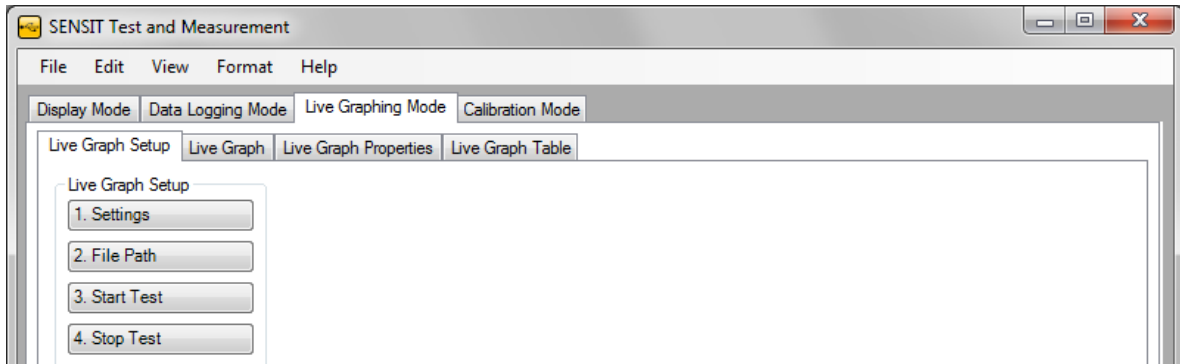


Figura 21 Función Live Graphing Mode

Al darle *click* a la pestaña de *Live Graphing Mode* aparecerán cuatro botones el número uno es para poner todas las características que le queremos dar a la prueba, al hacer *click* sobre el botón *Settings* aparecerá la ventana de la figura 22.

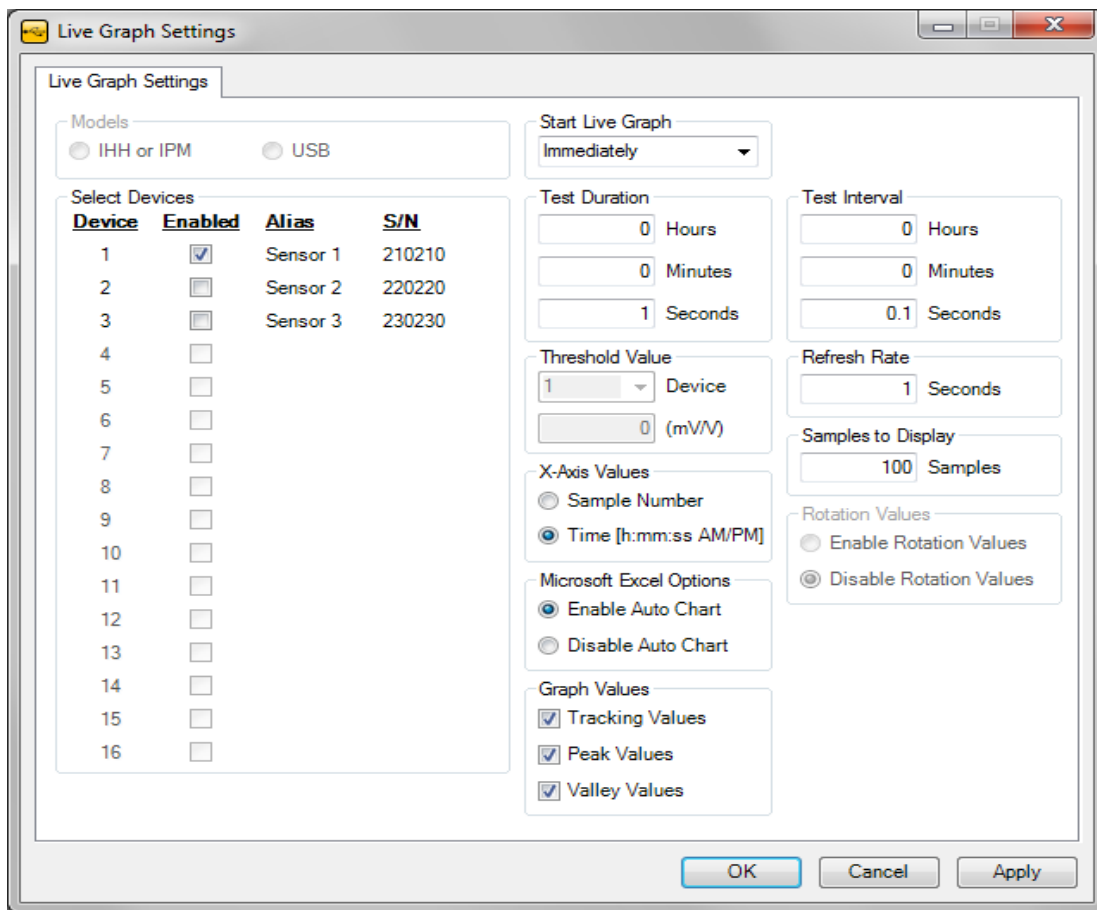


Figura 22 Parámetros deseados

En esta ventana observamos del lado izquierdo la verificación de que el sensor está activo, del lado derecho están las características que quieras darle, en *Test Duration* se pondrá el tiempo que quieras que dure la prueba, en *Test Intervalo* pondrás el tiempo en el que se tomaran las lecturas, en *X-Axis Values* pondrás lo que quieres que te muestre en el eje x, si el número de muestra o la fecha y la hora en que se hizo la prueba, en *Microsoft Excel Options* aquí decidirás si es que lo desees exportar a Excel que te muestre la gráfica o solo los valores y por último esta *Graph Values* en esta parte están seleccionados las tres casillas que representan el valor pico, el valor valle y el valor que se está registrando, el que siempre tiene que estar activo es la casilla *Tracking Values* debido a que es el valor que es el valor que se está, los otros dos son los valores máximo y mínimo que se llegó a registrar los cuales te sirven para calcular el error. Al final solo queda dar *click* al botón *Apply* y posteriormente a *OK*, si solo se aprieta el *OK* no se realizaran los cambios hechos.

El segundo botón (*File path*) nos sirve para decidir en donde y como se va a llamar el archivo que se va a exportar una vez acabada la prueba y si es que así lo desea cambiar el tipo de archivo, ya que por defecto viene te lo va a exportar a un archivo Excel, cada que se realice una prueba se tendrá que cambiar el nombre porque si no lo va a sobrescribir.

Los últimos dos botones son el *Star Test* y el *Stop Test* que los cuales como sus nombres lo dicen son para iniciar y si es necesario parar la prueba, ya que si no se necesita para la prueba esta dejara de tomar lectura terminando el intervalo de tiempo establecido en el botón de *Settings*, al darle *click* en el botón de *Star Test* se cambiara rápidamente a la pestaña de *Live Graph*, donde se estará haciendo una gráfica en tiempo real.

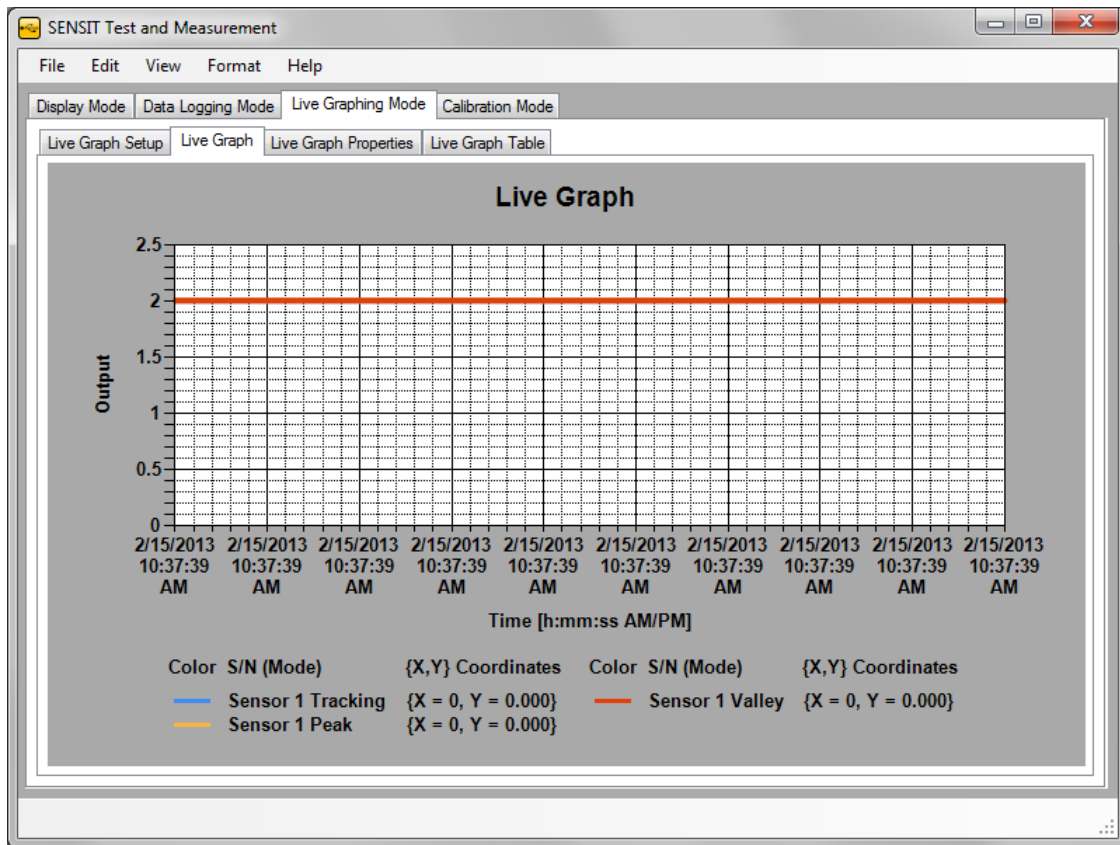


Figura 23 Gráfica en tiempo real hecha por el programa

Anexo B

Las soluciones usadas en este trabajo fueron NaOH a 0.35M y HCl a 1M. El cálculo de volumen requerido se lleva a cabo de la siguiente manera:

Para una concentración 1M de NaOH se necesitarían 40 g por cada litro de agua, entonces para medio litro de agua se necesitaran 20 g, pero se necesita una concentración de 0.35 por lo que se realiza una cadena de tres para calcular el valor

$$\begin{array}{l} 1M \rightarrow 20g \\ 0.35 \rightarrow x g \end{array}$$

Entonces se necesitan 7 g de NaOH para 0.5 L de agua para hacer una concentración 0.35M

Para una concentración 1M se necesitarían 36.46 g de HCl por cada litro de agua, si se necesita hacer medio litro de esta solución se necesitaría 18.23 g de HCl, pero el HCl es una solución líquida por lo que es más sencillo calcularlo por volumen.

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{18.23 g}{1.19 g/m^3} = 15.32 cm^3 \text{ o } ml$$

Esto es solo si se tiene una pureza del 37%