Licenciatura: Ingeniería Mecánica.
Nombre del proyecto: Análisis de incertidumbres en la medida de la potencia mecánica entregada por agitadores radiales y axiales en tanques agitados mecánicamente.
Modalidad: Proyecto de Investigación.
Versión: Primera.
Trimestre Lectivo: 22 O.

Datos del alumno:
Nombre: Victor Javier Faustino Medrano.
Matricula: 2192008069.
Correo: za16zaz@gmail.com

Firma: _____

Datos del asesor:
Asesor: Dr. Jorge Ramírez Muñoz.
Categoría: Titular C.
Departamento: Energía.
Teléfono: 55 2213 7291
Correo electrónico: jrm@azc.uam.mx

Firma: _____

Datos de los co-asesores:
Co-asesor: M.I.P. Javier Álvarez Vega.
Categoría: Estudiante de doctorado.
Departamento: Energía.
Teléfono: 52 442 609 7376
Correo electrónico: vega.javier.alvarez@gmail.com

Firma: _____

Co-asesor: Dr. Valaur Ekbalam Márquez Baños.
Categoría: Titular B.
Departamento: Departamento de Procesos y Tecnología, UAM Cuajimalpa.
Teléfono: 961 131 6559
Correo electrónico: vekbalam@gmail.com

Firma: _____

Fecha: 09 de diciembre de 2022.

DECLARATORIA

En caso de que el Comité de Estudios de la Licenciatura en Ingeniería Mecánica apruebe la realización de la presente propuesta, otorgamos nuestra autorización para su publicación en la página de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería.

_____

Faustino Medrano Victor Javier.

_____

Dr. Jorge Ramírez Muñoz.

_____

M.I.P. Javier Álvarez Vega.

_____

Dr. Valaur Ekbalam Márquez Baños.

1. Introducción.

En los procesos industriales existe una gran variedad de situaciones en las que es necesario romper los aglomerados de partículas y dispersarlas en líquidos hasta alcanzar cierto grado deseado de homogeneidad, por ejemplo, mezclando pigmentos dentro de una pintura a base de agua o aceite, mezclando cemento con agua, entre otros. Para lograr esto, se utiliza la agitación de fluidos en tanques agitados mecánicamente, que es un proceso comúnmente usado en la industria, el cual permite acelerar la transferencia de calor y masa. Mediante esta operación es posible introducir energía en el volumen del fluido, es decir, que la energía cinética que posee el impulsor se transfiere al fluido ocasionando su movimiento [1].

Los impulsores que se utilizan para lograr este objetivo pueden ser clasificados de acuerdo con el tipo de flujo que inducen en el tanque agitado como impulsores de flujo axial y de flujo radial. El consumo de potencia de un impulsor (agitador) específico durante el mezclado influye significativamente en los costos del proceso de mezcla, por lo que resulta relevante medirlo experimentalmente.

Una de las maneras de determinar la potencia mecánica demandada por un impulsor en un tanque agitado mecánicamente, empleando un fluido newtoniano como fluido de trabajo, es medir experimentalmente el torque dinámico (τ) y el número de revoluciones por minuto (N) que se ejercen sobre el eje del impulsor. Para lograr esto, es común el uso de instrumentos digitales como los medidores de torque dinámico o los dinamómetros.

No obstante, para expresar el resultado de una medición de cualquier parámetro o magnitud física, es necesario indicar, cuantitativamente, la calidad del resultado. Sin dicha indicación, no es posible comparar las mediciones entre sí, ni con otros valores de referencia dados en especificaciones o normas. Por ello, es necesario establecer un procedimiento comprensible y universal para caracterizar la calidad de una medición, evaluando y expresando su incertidumbre.

La norma ISO/IEC 17025:1999, en su apartado 5.4.6.1, señala que, un laboratorio de calibración o de ensayos, que realiza sus propias calibraciones, debe tener y aplicar un procedimiento para estimar la incertidumbre de medición para todas las calibraciones y tipos de calibración. Siguiendo esta normatividad, la “Guía BIPM/ISO para la Expresión de la Incertidumbre en las Mediciones” establece reglas generales para evaluar y expresar la incertidumbre de medida.

El presente trabajo pretende detallar, evaluar y expresar la incertidumbre asociada a mediciones de potencia mecánica entregada por impulsores de flujo axial y radial, siguiendo el procedimiento universalmente aceptado que establece la “Guía BIPM/ISO para la Expresión de la Incertidumbre en las Mediciones”. Ofreciendo así, una metodología para obtener mediciones confiables de potencia mecánica, así como su incertidumbre asociada.

2. Antecedentes.

Martínez-de Jesús et al. [1] Emplearon un modelo matemático que permite determinar la potencia mecánica demandada por un impulsor de alto corte en fluidos newtonianos, a partir de la obtención de mediciones experimentales del torque (τ) y número de revoluciones por minuto (N) que se ejercen sobre el eje del impulsor. Dicho modelo matemático sienta las bases para la elaboración de un modelo propio que permita determinar la potencia mecánica entregada por impulsores de flujo axial y radial, en base a los intereses y alcances del presente proyecto.

Ramírez-González et al. [2] Evaluaron el rendimiento de dos impulsores de alto cizallamiento en tanques agitados con deflectores. En dicha evaluación se estableció una metodología experimental para obtener mediciones de torque en la agitación proveída por un Motor Dispermat® AE01 de velocidad variable de 0,75 HP. Esta metodología establece las relaciones geométricas pertinentes para obtener las mediciones de torque dinámico utilizando un torquímetro digital. La metodología experimental de medición de torque que se utilizará en el presente estará basada en aquella aquí establecida.

Ascancio. G et al [3]. Presentaron una revisión de las diferentes formas de medir la potencia mecánica en tanques agitados. En dicha revisión, se explican las ventajas y desventajas de medir la potencia mecánica implementando torquímetros digitales, así mismo, se explica el funcionamiento de estos instrumentos, además de mencionar algunos de los antecedentes históricos en los que se han implementado estos instrumentos para este fin. Esta revisión sienta un sustento teórico e histórico en el uso de torquímetros digitales en la determinación de la potencia mecánica. Lo cual, cae dentro de los intereses del presente proyecto.

Guadarrama-Pérez et al. [4] Realizaron mediciones de troque dinámico empleando un sensor de torque Futek modelo TRH300-FSH1980 de 6 $mN \cdot m$ de resolución y un dinamómetro digital modelo Andilog CNR-EA-TRD6. De esta bibliografía, se rescatarán la forma de uso y las condiciones pertinentes de ambos equipos, debido a que se utilizarán los mismos modelos en la medición de torque dinámico.

Ramírez-Muñoz et al. [5, 6] Determinaron las propiedades fisicoquímicas de una disolución de glucosa (grado alimenticio) al 36 % en peso de glucosa utilizada como fluido de trabajo en la medición de potencia mecánica para un tanque cilíndrico enchaquetado, sin deflectores, de acero inoxidable, con fondo convexo y diámetro interno T= 132mm Utilizando como como instrumento de medición de torque dinámico un sensor de torque Futek modelo TRH300-FSH1980 de 6 $mN \cdot m$ de resolución. Así mismo, se utilizó un baño de enfriamiento con recirculación marca Scorpion Scientific Modelo A20300 de 11 L de capacidad para mantener la temperatura de la disolución a 23°C. Esta metodología servirá como base para determinar las propiedades fisicoquímicas del fluido de trabajo que se empleará en la medición de potencia mecánica en un tanque cilíndrico agitado de 126 mm de diámetro. De igual forma, se utilizará un baño de enfriamiento del mismo modelo al utilizado en esta bibliografía.

En el año de 1977, se reconoció la falta de consenso internacional sobre la forma de expresar la incertidumbre de medida, en base a esto, mediante la Recomendación INC-1 (1980), el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) pidió a la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) que abordara el problema. De esta manera, se creó la "Guía BIPM/ISO para la Expresión de la Incertidumbre en las Mediciones" [7]. Esta Guía establece reglas generales para evaluar y expresar la incertidumbre de medida, que pueden seguirse para los diversos niveles de exactitud requeridos y en diversos campos, desde el taller hasta la investigación. Esta guía puede ser aplicada en el control y calidad de producción, investigación y desarrollo aplicados en ciencia e ingeniería, calibración de instrumentos, etc. Se utilizará la metodología establecida por esta guía para evaluar y expresar la incertidumbre asociada a mediciones de potencia mecánica.

En la Guía BIPM/ISO se establecen las reglas generales de evaluación y expresión de incertidumbres, sin embargo, no se establecen formatos de cálculo específicos. Debido a esto, los laboratorios diseñan sus propios formatos de cálculo electrónicos, dando lugar a que dichos formatos solo sean entendibles para la persona que los realizó. Ante esta situación, organismos europeos como la European co-operation for Acreditation (EA) y el Deutscher Kalibrierdienst (DKD), han establecido el uso de una Tabla de Cálculo de Incertidumbre (TCI) universal en documentaciones como el EA-4/02 [8] y el DKD-3 [9]. De esta documentación internacional se extraerá la metodología a seguir para conformar la TCI que permita expresar las mediciones de potencia mecánica y su incertidumbre asociada, en un formato universalmente aceptado.

3. Justificación.

Históricamente, se ha reconocido la falta de consenso internacional sobre la forma de expresar la incertidumbre de medida. Surgiendo así, la necesidad de implementar normatividades, documentación y guías universales que permitan establecer reglas y metodologías generales para evaluar y expresar la incertidumbre en las mediciones, como es el caso de la norma ISO/IEC 17025:1999, la Guía BIPM/ISO, el EA-4/02 y el DKD-3.

En este sentido, la importancia de la realización de este proyecto radica en estimar y expresar la incertidumbre asociada a mediciones de potencia mecánica empleando impulsores que favorezcan el fuljo axial e impulsores que favorezcan el flujo radial, en base a pautas universalmente aceptadas. Aunado a esto, la correcta expresión de la medición de la potencia mecánica y su incertidumbre asociada favorece el desarrollo e investigación aplicados a la ciencia y la ingeniería, pues los resultados de este proyecto permitirán utilizar aquellas mediciones que tengan un nivel de confianza significativo de acuerdo con sus incertidumbres. Esto debido a que es poco común que en la literatura se encuentren mediciones de potencia mecánica expresadas correctamente con su incertidumbre asociada.

4. Objetivos.

Objetivo general:

- Estimar la incertidumbre asociada a mediciones de potencia mecánica entregada por diferentes tipos de agitadores radiales y axiales en base a la Guía BIMP/ISO.

Objetivos específicos:

- Plantear un modelo matemático que permita analizar la potencia mecánica entregada por agitadores radiales y axiales en base a parámetros medibles.
- Identificar y describir las fuentes de incertidumbre en base al modelo matemático de medición.
- Cuantificar el impacto de los instrumentos de medida empleados para la medición de potencia mecánica.
- Evaluar y detallar el impacto de las fuentes de incertidumbre identificadas.

5. Metodología.

5.1 Preparación de los fluidos modelos.

Se prepararán 2 fluidos de trabajo. El primero consistirá en la disolución de glucosa grado alimenticio al 5% P/P en agua desionizada. Para ello se pesarán 5 g de glucosa y se disolverán en 995 g de agua desionizada.

El segundo se preparará mediante la disolución de carboximetil celulosa de alta viscosidad (CMC-HV) grado reactivo en una concentración de 1%. Para ello se pesará 1 g de CMC-HV y se disolverá en 999g de agua desionizada.

5.2 Medición de la viscosidad de los fluidos modelos.

La caracterización de la viscosidad de los fluidos modelos se realizará mediante su medición en un rango de velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) de $1X10^{-3}$ hasta $1X10^{3}$ s^{-1} a una temperatura constante de 25 ºC, en un reómetro Anton Paar® MCR 502, con una geometría de cono y plato. Para ello, una vez preparada las soluciones de glucosa y CMC-HV se tomará una muestra de 600 μL a la cual se le realizará la lectura. Posterior se realizará el ajuste de la viscosidad mediante la linealización la ley de potencias, siendo:

$$\tau = k\dot{\gamma}^{n}$$

donde, τ es el esfuerzo de corte, k el índice de consistencia y n el índice de fluido.

5.3 Montaje experimental.

Las mediciones de torque dinámico se realizarán en un tanque cilíndrico enchaquetado, de acero inoxidable, con fondo convexo y diámetro interno T=126 m (Figura 1). Las relaciones geométricas que se utilizarán en los experimentos de distancia del impulsor al fondo del tanque (C), altura del líquido (Z) y diámetro del impulsor (D) serán: C/T=0.3848, Z/T=1 y D/T=0.3848, respectivamente.

Se utilizará el equipo de agitación Dispermat® tipo AE01 de 0.75 HP. Los datos de potencia pueden transferirse en línea hacia un ordenador por medio de una tarjeta RS232 o leerse directamente en pantalla.

El fluido de proceso se mantendrá a una temperatura de 20 ± 0.5 °C, para ello se hará uso de un baño de enfriamiento con recirculación marca Scorpion Scientific Modelo A20300 de 11 L de capacidad.

Los experimentos que se llevarán a cabo se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. *Experimentos a llevar a cabo.*

Velocidad del impulsor (RPM)	Fluido de trabajo		Impulsor		Bafles	
100	Glucosa	CMC-HV	Rushton	Alto corte	Si	No
200	Glucosa	CMC-HV	Rushton	Alto corte	Si	No
300	Glucosa	CMC-HV	Rushton	Alto corte	Si	No
400	Glucosa	CMC-HV	Rushton	Alto corte	Si	No
500	Glucosa	CMC-HV	Rushton	Alto corte	Si	No
600	Glucosa	CMC-HV	Rushton	Alto corte	Si	No
700	Glucosa	CMC-HV	Rushton	Alto corte	Si	No
800	Glucosa	CMC-HV	Rushton	Alto corte	Si	No
900	Glucosa	CMC-HV	Rushton	Alto corte	Si	No
1000	Glucosa	CMC-HV	Rushton	Alto corte	Si	No

5.4 Estimación de incertidumbre.

La medición de la incertidumbre se realizará basándose en la Guía BIPM/ISO para la Expresión de la Incertidumbre en las Mediciones (GUM) establece pasos específicos a seguir para encontrar y expresar la incertidumbre de una medición. Estos pasos establecidos por la GUM conformaran, en gran parte, la metodología a seguir para detallar, evaluar y expresar la incertidumbre asociada a mediciones de potencia mecánica en tanques agitados mecánicamente.

La metodología establecida para la estimación de la incertidumbre en función a la GUIA BIPM/ISO será la siguiente:

5.4.1 Se elaborará un modelo matemático de medición, dicho modelo matemático se realizará en base a parámetros físicos medibles relacionados a la potencia mecánica. Los parámetros que se tomarán en cuenta son el torque dinámico (τ) y el número de revoluciones por minuto (N).

5.4.2 Una vez obtenidas las mediciones de torque dinámico, con base en el modelo matemático se identificarán las posibles fuentes de incertidumbre. Estas fuentes de

incertidumbre pueden estar asociadas a la calibración de los instrumentos empleados, a los errores que estos presenten, los cuales se indican en el manual y especificaciones de cada equipo, a la resolución de cada equipo, entre otros factores.

5.4.3 Después de identificar las fuentes de incertidumbre, y representarlas en el modelo matemático, se evaluará la incertidumbre estándar de dichas fuentes de incertidumbre. Para hacer esto, se utilizará la información proveniente de certificados de calibración, especificaciones y características de los instrumentos utilizados, además de datos experimentales y funciones de probabilidad asociadas.

5.4.4 Se determinará la incertidumbre estándar combinada de las fuentes de incertidumbre identificadas. Mediante esta etapa se evaluará la contribución de cada fuente a la incertidumbre en la medición de la potencia mecánica. Así mismo, se evaluará que fuentes tienen un impacto más significativo en dicha incertidumbre.

5.45 Se determinará la incertidumbre expandida, la cual tiene en cuenta tanto el error sistemático como el error aleatorio. Se determinarán los grados de libertad que habrán de emplearse para tener un nivel de confianza significativo.

5.4.6 Finalmente, se construirá la Tabla de Cálculo de Incertidumbres, la cual permitirá expresar la medición de potencia mecánica en tanques agitados mecánicamente, así como su incertidumbre asociada y el nivel de confianza aproximado con el que se expresan tanto la medición como su incertidumbre.

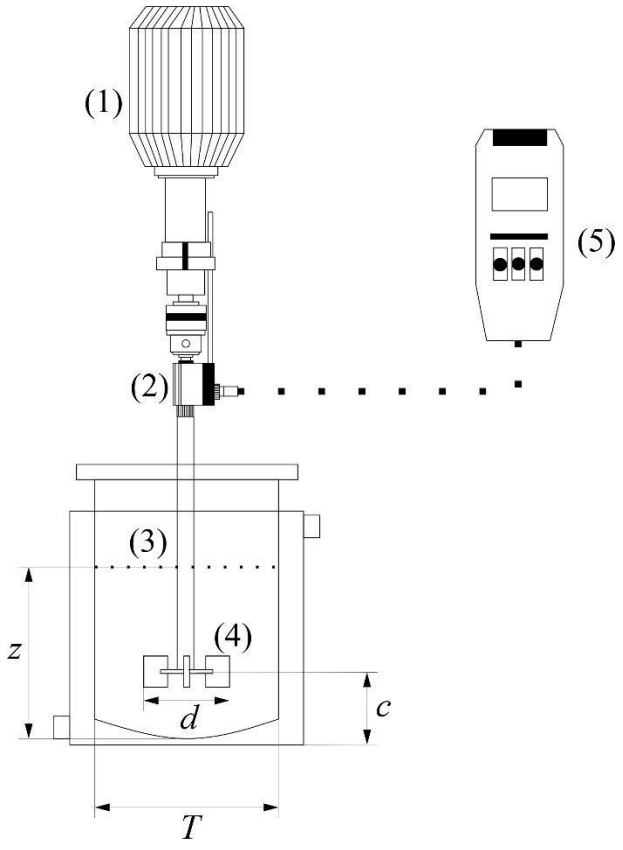

Figura 1. Esquema del equipo experimental usado en las mediciones de potencia: (1) Equipo Dispermat® tipo AE01; (2) Sensor de torque Futek TRH300-FSH1980; (3) Tanque cilíndrico con fondo cóncavo; (4) Impulsor; (5) Sensor de fuerza Andilog modelo CNR-EA-TRD6.

Elaborado de fuente propia.

6. Normatividad.

ISO/IEC 17025:1999 "Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración". Esta norma establece los requisitos generales para la competencia en la realización de ensayos utilizando métodos normalizados, métodos no normalizados y métodos desarrollados por el propio laboratorio en el que se realicen.

7. Cronograma de actividades.

UEA para la que se solicita autorización:

- Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica I.

	Actividades del trimestre 23-I	Semana											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Elaboración de un modelo matemático de medición.												
2	Realizar mediciones experimentales de torque dinámico.												
3	Identificación de fuentes de incertidumbre.												
4	Evaluación de la incertidumbre estándar.												
5	Determinación de la incertidumbre estándar combinada.												
6	Determinación de la incertidumbre expandida.												
7	Elaboración de la Tabla de Cálculo de Incertidumbre.												
8	Elaboración y entrega del reporte final.												

8. Entregables.

- Tabla de Cálculo de Incertidumbres en hoja de cálculo electrónica.
- Reporte final de proyecto de integración.

9. Referencias bibliográficas.

[1] Martínez, G., Ramírez, J., García, D. y Cota, L., 2018, "Computational Fluid Dynamics Study of Flow Induced by a Grooved High-Shear Impeller in an Unbaffled Tank". Chemical Engineering & Technology, No. 03, pp. 580-589.

[2] Ramírez, R., G., Martínez, G., González, M., Martínez, S., Ramírez, J. y García, D., 2015, "Performance Evaluation of Two High-Shear Impellers in an Unbaffled Stirred Tank", Chemical Engineering & Technology, No. 09, pp. 1519-1529.

[3] Ascanio, G., Castro, B. y Galindo, E., 2004, "Measurement of power consumption in stirred vessels-a review", Chemical Engineering Research and Design, 82(A9), pp. 1282-1290.

[4] Guadarrama, R., Márquez, V., De la Concha, A., Valencia, J., Vengoechea, A., Martínez, G. y Ramírez, J., 2020, "Hydrodynamic Performance of a Ring-Style High-Shear Impeller in Newtonian and Shear-Thinning Fluids". Chemical Engineering & Technology, No. 43, pp. 1-12.

[5] Ramírez, J., García, D., Colín, J. y Tapia, C., 2016, "Efecto de la Evolución del Vórtice sobre los Parámetros Hidrodinámicos de un Sistema de Dispersión Mecánica de Pigmentos: informe final", Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Azcapotzalco, Ciudad de México.

[6] Ramírez, J., Martínez, G., Soria, A., Alonso, A. y Torres, L., 2016, "Assessment of the effective viscous dissipation for deagglomeration processes induced by a high shear impeller in a stirred tank", Advanced Powder Technology, 27, pp. 1885–1897.

[7] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 2008, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement".

[8] EA, 2022, "EA-4/02 Expressions of the Uncertainty of Measurements in Calibration". http://www.european-accreditation.org.

[9] DKD, 2018, "DKD-3 Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen". http://www.dkd.ptb.de.

10. Terminología.

No aplica.

11. Infraestructura.

Laboratorio de análisis de procesos, edificio W planta baja, Universidad Autónoma Metropolitana: Unidad Azcapotzalco, el cual cuenta con los siguientes equipos:

Reómetro Anton Paar® MCR 502

Equipo de agitación Dispermat® tipo AE01 de 0.75 HP.

Sensor de torque Futek modelo TRH300-FSH1980.

Sensor de fuerza Andilog modelo CNR-EA-TRD6.

Baño de enfriamiento con recirculación marca Scorpion Scientific Modelo A20300 de 11 L de capacidad.

12. Asesoría complementaria.

No aplica

13. Publicación o difusión de los resultados.

Se difundirán los resultados obtenidos en Encuentro Nacional de la Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química (AMIDIQ) 2023.