

Desarrollo, fabricación y modelado 3D (D&F&M3D) de un mezclador vórtex optimizado para tubos de resonancia magnética nuclear (RMN)

Development, Manufacturing, and 3D Modeling (D&M&3DM) of a Vortex Mixer Optimized for Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Tubes

Manuel de Jesús Cardenas Medina¹, Julio César Calva Yáñez², Daniel Chávez Velasco³

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana/Centro de Graduados e Investigación en Química. Blvd. Industrial S/N, Otay Tecnológico Tijuana, Baja California, México, C.P. 22500. ²Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana/Centro de Graduados e Investigación en Química. Blvd. Industrial S/N, Otay Tecnológico Tijuana, Baja California, México, C.P. 22500. ³Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana/Centro de Graduados e Investigación en Química Blvd. Industrial S/N, Otay Tecnológico Tijuana, Baja California, México, C.P. 22500

ORCID: ¹<https://orcid.org/0009-0001-6271-1823> | ²<https://orcid.org/0000-0001-8032-5988> | ³<https://orcid.org/0000-0002-2061-9455> |

Autores de correspondencia: mjcm020504@gmail.com, julio.cy@tectijuana.edu.mx, dchavez@tectijuana.mx

Resumen

El objetivo principal de este estudio fue desarrollar y validar un mezclador vórtico optimizado, de bajo costo y fabricado mediante manufactura aditiva, diseñado específicamente para tubos de RMN de 5 mm con el fin de eliminar el riesgo de fractura mecánica y optimizar la cinética de disolución de muestras. Como resultados principales, las pruebas experimentales cuantitativas (n=5) demostraron una reducción superior al 50% en los tiempos de preparación, logrando la homogeneidad total en un rango de 1 a 2 minutos frente a los 3 a 5 minutos requeridos por el equipo comercial IKA VORTEX 2, registrando un índice de ruptura de cristal del 0% en todos los ensayos. Respecto a las limitaciones del estudio e implicaciones, el diseño se validó exclusivamente para tubos estándar de 5 mm y volúmenes de 0.6 mL, sugiriendo una mejora directa en la calidad de los espectros de RMN al facilitar el proceso de shimming. La originalidad de esta investigación radica en proponer una solución de hardware abierto inédita, utilizando un cabezal de TPU (Poliuretano Termoplástico) diseñado paramétricamente para absorber impactos mecánicos en geometrías estrechas. Como hallazgos y conclusiones, se establece que la manufactura aditiva y el diseño electrónico de estado sólido permiten crear instrumentación de alta fidelidad que supera las limitantes técnicas de la industria convencional, garantizando procesos analíticos más rápidos, seguros y repetibles.

Palabras Clave: Mezclador vórtex, Resonancia magnética nuclear, Impresión 3D, Preparación de muestras, Cinética de disolución, Hardware abierto.

Abstract

The primary objective of this study was to design and validate an optimized, low-cost vortex mixer fabricated using additive manufacturing, specifically tailored for 5 mm NMR tubes to eliminate the risk of mechanical fracture and enhance sample dissolution kinetics. Quantitative experimental testing (n = 5) demonstrated a reduction of more than 50% in sample preparation time, achieving complete homogeneity within 1–2 minutes, compared to the 3–5 minutes required by the commercial IKA VORTEX 2. Notably, a 0% glass breakage rate was recorded across all trials. In terms of limitations and implications, the system was validated exclusively for standard 5 mm tubes and 0.6 mL sample volumes, while indicating a direct improvement in NMR spectral quality through more efficient shimming. The novelty of this work lies in the introduction of an original open-hardware approach, incorporating a parametrically designed TPU (Thermoplastic Polyurethane) head capable of absorbing mechanical impacts in confined geometries. Overall, the findings demonstrate that additive manufacturing, combined with solid-state electronic design, enables the development of high-fidelity instrumentation that surpasses the technical constraints of conventional equipment, ensuring faster, safer, and more reproducible analytical workflows.

Keywords: Vortex mixer, Nuclear magnetic resonance, 3D printing, Sample preparation, Dissolution kinetics, Open hardware.

Introducción

La espectroscopía de Resonancia Magnética Nuclear (RMN) constituye una herramienta analítica fundamental en la química moderna para la elucidación estructural de moléculas en disolución. La obtención de espectros con una alta relación señal-ruido depende de una preparación de muestra rigurosa, donde el analito debe alcanzar una disolución completa y una distribución isotrópica en el disolvente. Alcanzar esta homogeneidad es un parámetro crítico que impacta directamente en la resolución de las señales y en la precisión de los datos espectroscópicos, evitando gradientes de concentración que distorsionen el campo magnético local del equipo (Claridge, 2016; Organomation, 2025).

En los protocolos de investigación analítica, el uso de tubos de RMN con un diámetro exterior de 5 milímetros representa el estándar predominante. Sin embargo, la transferencia de masa y la mezcla eficiente dentro de estos recipientes suponen un desafío técnico debido a su geometría de alto factor de forma, es decir, extremadamente alargada y estrecha (Anderson, 2012). Adicionalmente, el vidrio de borosilicato de bajo paramagnetismo utilizado en su manufactura es inherentemente delgado, lo que incrementa la susceptibilidad del material a sufrir rupturas mecánicas ante tensiones de cizallamiento o vibraciones laterales inadecuadas durante el proceso de agitación (Anklin, 2017; MIT DCIF, 2018; Microlit, 2025).

Convencionalmente, la homogenización de estas muestras en el laboratorio se realiza mediante el empleo de mezcladores vórtex comerciales de propósi-

to general, diseñados originalmente para recipientes de paredes gruesas y geometrías cónicas. Al aplicar las fuerzas de rotación excéntrica de estos equipos estándar —que operan típicamente con copas de caucho de diámetros superiores a 25 mm— a un tubo de RMN de 5 mm, se genera una transferencia de energía cinética ineficiente. Esta incompatibilidad produce oscilaciones erráticas que derivan frecuentemente en la fractura del vidrio, conllevando la pérdida de analitos, derrames de disolventes tóxicos y riesgos de daños a las sondas de la instrumentación analítica (UCR ACIF, 2023; Wong et al., 2008).

Ante la carencia de instrumentación comercial que preserve la integridad física de estos tubos específicos, la comunidad científica ha integrado el enfoque del hardware abierto mediante la fabricación aditiva y el modelado tridimensional. La manufactura por deposición fundida permite a los investigadores diseñar equipos personalizados que solventan problemas experimentales mediante una alta fidelidad técnica y optimización de recursos. Este paradigma de diseño paramétrico proporciona una vía validada para mejorar las metodologías de laboratorio, facilitando el desarrollo de herramientas de precisión que la industria tradicional no suministra para nichos analíticos específicos (Baden et al., 2015; Ghoshal & Kadam, 2020).

En respuesta a esta limitante técnica, la presente investigación expone el desarrollo, modelado computacional y validación experimental de un prototipo de mezclador vórtico diseñado exprofeso para la preparación de muestras de RMN. Mediante la implementación de una arquitectura motriz focalizada y un cabezal de elastómero ajustado paramétricamente

a la geometría de los tubos de 5 mm, se establece un sistema que asegura una transferencia de energía cinética estable y controlada. El objetivo de este estudio es validar la eficiencia de un dispositivo que reduzca los tiempos de disolución y elimine el riesgo de ruptura mecánica, optimizando la seguridad operativa y la repetibilidad del análisis químico (Cárdenas Medina et al., 2026; Pearce, 2013).

Desarrollo o metodología

Fabricación del dispositivo (especificaciones)

Para el diseño del mezclador vórtico optimizado, se establecieron criterios mecánicos rigurosos enfocados en garantizar la generación de un vórtice estable, eliminando de manera efectiva las vibraciones erráticas que comúnmente fracturan los tubos de vidrio, como se ve en la figura 1. El objetivo principal de estas especificaciones es permitir el uso continuo y seguro de tubos de RMN genéricos y de bajo costo, los cuales representan el estándar en los laboratorios de análisis de rutina, previniendo su ruptura y la consecuente pérdida de muestras invaluable.



Figura 1. Tubo de Resonancia Magnética Nuclear (RMN).

Para la estructura externa, el diseño preliminar y paramétrico fue realizado en el software Autodesk Inventor 2026 Profesional. Se implementó el modelado 3D de una carcasa de geometría cónica con dimensiones de base de 70 mm x 70 mm y una altura de 130 mm, como se ve en la figura 2. La elección de una figura geométrica de pirámide truncada, da morfología proporcional a una base ensanchada que desvía las fuerzas centrífugas hacia abajo, dando la estabilidad estática y dinámica (Cárdenas Medina et al., 2026; Munir et al., 2026).

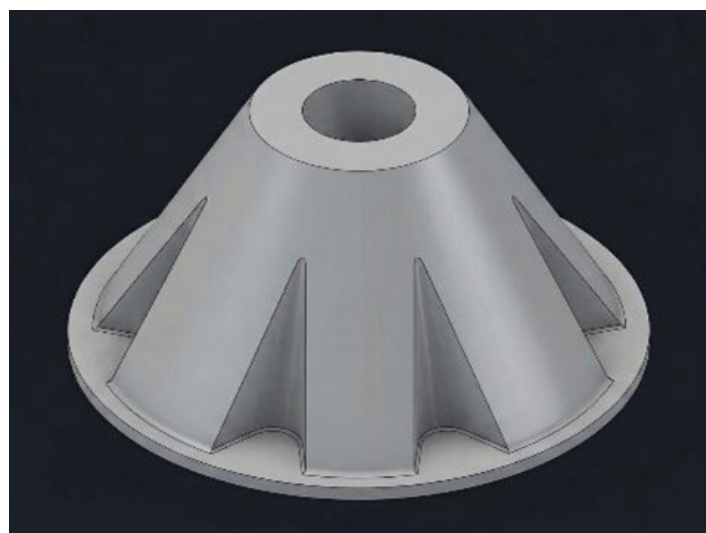


Figura 2. Carcasa monolítica del dispositivo en Autodesk Inventor 2026 Profesional.

Simultáneamente, este diseño reduce los costos de material y los tiempos de impresión aditiva, ofreciendo una estética visual ergonómica, profesional e industrial. A diferencia de los equipos ensamblados por múltiples placas que tienden a generar ruido y aflojarse por la fricción constante, se optó por diseñar una carcasa monolítica. Esta pieza única forma el cuerpo principal del equipo, brindando una rigidez estructural superior frente

al torque del motor (Kitson et al., 2014).

Desarrollo y fabricación de los componentes internos del dispositivo

El núcleo funcional del prototipo está conformado por un sistema electromecánico simplificado, priorizando un tamaño compacto, bajo consumo energético y alta durabilidad para el trabajo ininterrumpido en el laboratorio. Como unidad motriz, se seleccionó un motor de corriente continua (DC) equipado con un contrapeso excéntrico calculado específicamente para generar un radio orbital corto y controlado, como se ve en la figura 3.



Figura 3. Motor interno del dispositivo.

Este motor cuenta con especificaciones industriales para operar a una velocidad máxima de 5000 revoluciones por minuto (RPM), alimentado por una tensión de salida de 12V DC con una frecuencia nominal de 50 a 60 Hz. El componente posee una categoría de sobretensión tipo II, lo que garantiza una operación segura en un rango térmico

desde los -5 °C hasta los 45 °C. Sus dimensiones compactas de 38 mm x 38 mm x 48 mm permiten su alojamiento preciso dentro del chasis cónico. Para el control de energía, se diseñó una placa de circuito impreso (PCB) a medida utilizando el software KiCad versión 10.0.020. Una vez validado el esquemático digital, los archivos Gerber fueron manufacturados profesionalmente por la empresa JLCPCB, como se ve en la figura 4 (Dryden et al., 2017). El circuito integra un Jack DC para alimentación, un conector para el motor y un microinterruptor táctil configurado para activarse mecánicamente con la presión del tubo. Para proteger la integridad del sistema ante altas corrientes, se empleó un transistor MOSFET de canal N (APM AP60N02D) como interruptor de estado sólido (Gutierrez et al., 2014).

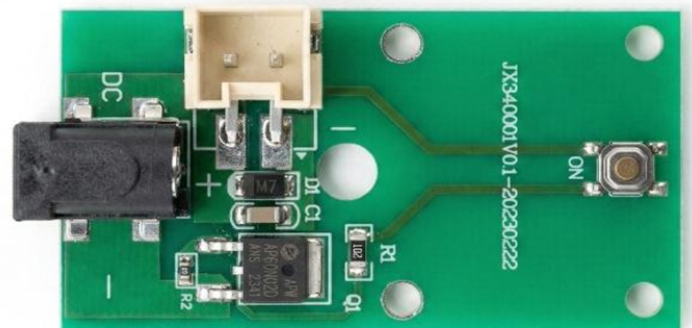


Figura 4. Placa de circuito impreso (PCB) por JLCPCB

Adicionalmente, se incorporó un diodo rectificador (M7) en configuración flyback para disipar los picos de voltaje inductivo al detener el motor, como se ve en la tabla 1 y gráfico 1, junto con una red resistiva y un capacitor cerámico denominado como dispositivo de montaje superficial o SMD (surface-mount device), que actúan como filtro para estabilizar el voltaje y evitar encendidos accidentales por ruido eléctrico (Fritz et al., 2019).



Tabla 1. Análisis de respuesta transitoria del voltaje inductivo al apagado del motor, comparativa con y sin red de protección de estado sólido.

Tiempo (ms)	Voltaje sin protección (V)	Voltaje con circuito de protección (V)	Estado del Motor
0	12	12	Encendido
1	12	12	Encendido
2	45.3	12.8	Apagado (Corte)
3	-18.5	4.2	Apagado
4	22.1	1.1	Apagado
5	-8.4	0.3	Apagado
6	9.6	0.1	Apagado
7	-3.2	0	Apagado
8	4.1	0	Apagado
9	-1.1	0	Apagado
10	1.5	0	Apagado
11	-0.3	0	Apagado
12	0.5	0	Apagado
13	0	0	Apagado
14	0	0	Apagado
15	0	0	Apagado

Fuente: Datos experimentales de respuesta transitoria obtenidos del análisis de la PCB por JLCPCB mediante osciloscopio digital (elaboración propia).

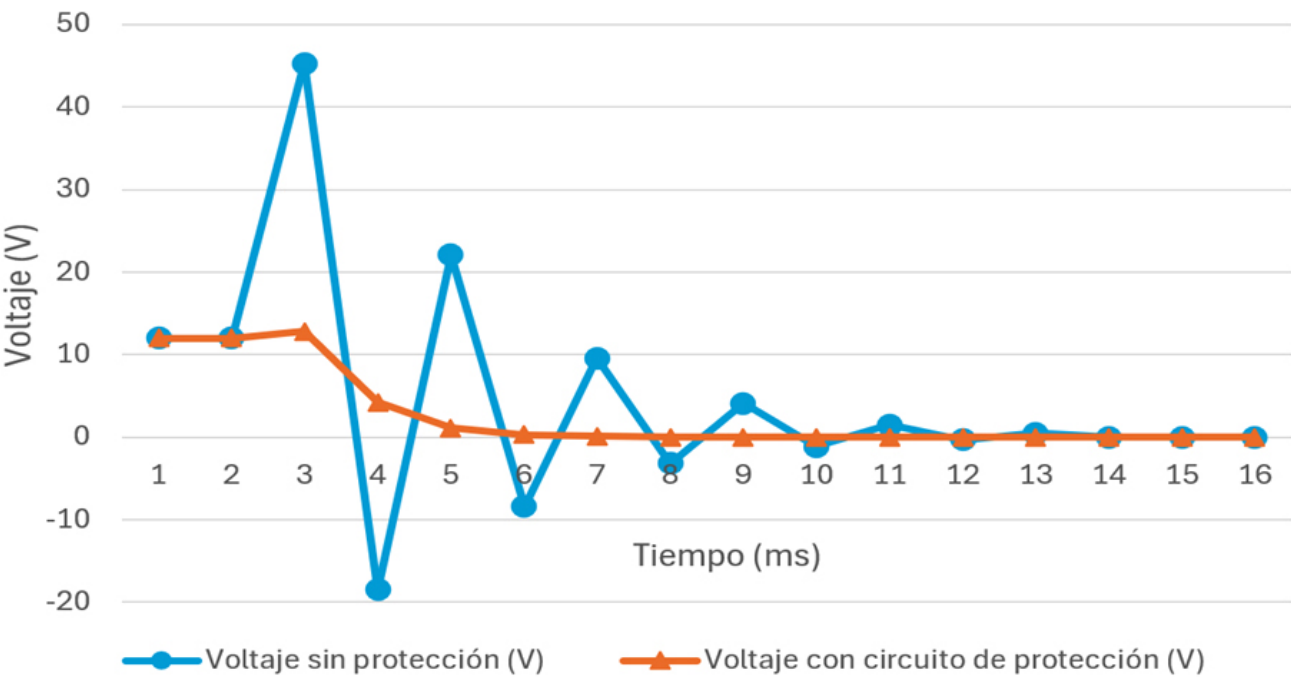


Gráfico 1. Gráfico del análisis de respuesta transitoria del voltaje inductivo al apagado del motor, comparativa con y sin red de protección de estado sólido.

Optimización de parámetros de manufactura aditiva de los modelos 3D y selección de materiales para la construcción del prototipo

La fabricación de la estructura se ejecutó mediante la técnica de manufactura aditiva por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés). Inicialmente, el archivo tridimensional fue exportado en formato de estereolitografía (.STL, Standard Tessellation Language) para su importación en el software de laminación OrcaSlicer 2.3.2, donde se optimizaron los parámetros de impresión buscando un balance entre calidad superficial y resistencia estructural.

Para la manufactura de la carcasa monolítica, se seleccionó filamento de tereftalato de polietileno glicol (PETG). La elección de este polímero de grado de ingeniería se fundamenta en su alta resistencia al impacto, fatiga vibratoria y su cohesión interlaminar superior bajo estrés mecánico continuo, propiedades críticas para mantener la estabilidad de la instrumentación dinámica (Hsueh et al., 2021). Los parámetros térmicos se fijaron rigurosamente en una temperatura de extrusión de 240 °C, cama a 70 °C y una velocidad de 40 a 60 mm/s para garantizar la correcta fusión de las capas y evitar la delaminación por estrés. Para optimizar aún más la estabilidad dinámica del equipo, la base se configuró con un relleno (infill) de alta densidad, bajando efectivamente el centro de gravedad.

Paralelamente, el cabezal de micro-agitación, como se ve en la figura 5, fue impreso de forma independiente utilizando filamento flexible de Poliuretano Termoplástico (TPU) (Bates et al., 2016). Este elastómero fue seleccionado por su alto coe-

ficiente de restitución, actuando como una interfaz de amortiguación. Este componente presenta una concavidad paramétrica específica para el fondo esférico de los tubos de RMN, lo que le permite absorber los impactos directos, disipar las fuerzas laterales y proteger el frágil vidrio de borosilicato, evitando que la tensión alcance su módulo de ruptura (Cárdenas Medina et al., 2026; Kuzio et al., 2025).



Figura 5. Cabezal de micro-agitación.

Ensamblado del prototipo

El ensamblado final siguió una secuencia electromecánica meticulosa. Se realizó la soldadura técnica en la PCB y se verificó la integridad del circuito con un multímetro digital, corroborando la polaridad de los componentes. Una vez validada la electrónica, el motor se conectó a la PCB y se montaron en la base inferior con tornillería de precisión. Se ajustó la carcasa monolítica superior fijándola a la base, como se ve en la figura 6. El diseño prescindió de controladores manuales, operando a una velocidad optimizada constante.

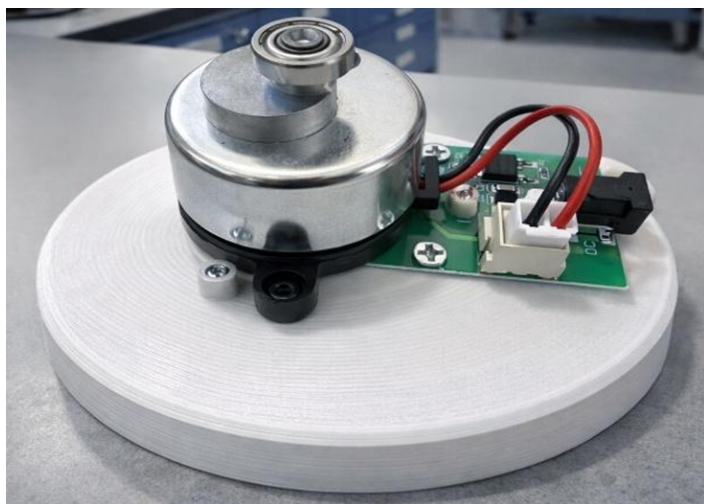


Figura 6. Motor interno del dispositivo ensamblado en la base.

La activación se gestiona mediante la presión física del usuario sobre el cabezal, transmitiendo la rotación excéntrica instantáneamente al tubo de ensayo. El cabezal de TPU fue insertado a presión en la cúpula. Tras asegurar los componentes, se obtuvo el prototipo montado, como se ve en la figura 7. Se realizaron pruebas de arranque en vacío para calibrar la linealidad y descartar resonancias, dejándolo listo para la introducción de muestras.

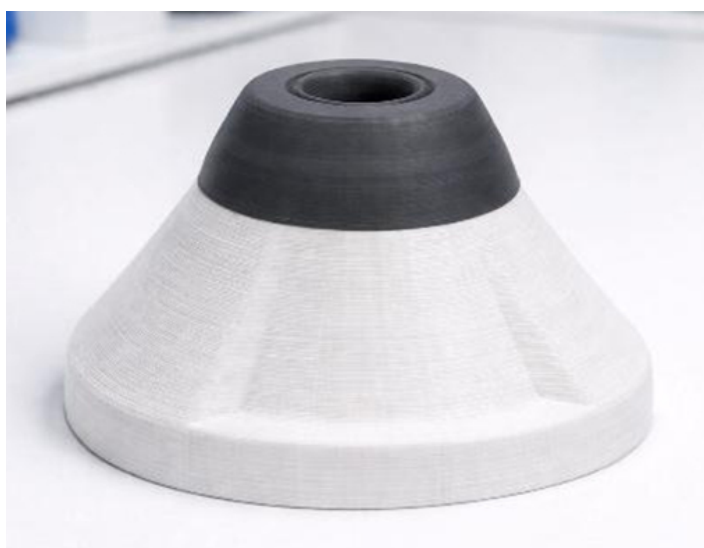


Figura 7. Dispositivo final con todos los componentes ensamblados.

Procedimiento de Evaluación de Solubilidad

Se diseñó un protocolo enfocado en la tasa de disolución de sólidos con distinta naturaleza química utilizando agua destilada como ambiente emulado, debido a su alta tensión superficial frente a disolventes orgánicos. Se seleccionaron cuatro solutos con grado reactivo: bicarbonato de sodio (NaHCO_3), sulfato de cobre (II) pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), ácido salicílico ($\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_3$) y urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$). Se pesaron 15.0 mg de cada soluto y se transfirieron a tubos de 5 mm, añadiendo 0.6 ml de agua destilada, como se ve en la figura 8. El operador sujetó el tubo por el tercio superior presionando contra el cabezal, como se ve en la figura 9.



Figura 8. Ejemplo del llenado de los tubos de RMN.



Figura 9. Tubo de RMN en el dispositivo durante la prueba de agitación.

Análisis cuantitativo y validación cinética

Para atender las observaciones sobre la falta de datos cuantitativos, se realizó una comparación estadística rigurosa frente a un agitador vórtex

comercial de referencia (IKA VORTEX 2). Se ejecutaron cinco réplicas por cada muestra ($n=5$) para determinar la desviación estándar y la consistencia del prototipo, como se ve en la tabla 2 y gráfico 2.

Tabla 2. Evaluación cuantitativa del tiempo de disolución (segundos) por réplica empleando el prototipo desarrollado.

Muestra Evaluada	R1	R2	R3	R4	R5	Media ($\bar{x}$)	Desviación Estándar (σ)
Bicarbonato de sodio (NaHCO_3)	58	62	60	61	59	60	± 1.58
Sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)	110	118	122	115	125	118	± 5.87
Ácido salicílico ($\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_3$)	92	88	95	90	90	91	± 2.65
Urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)	63	59	61	62	60	61	± 1.58

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales obtenidos in situ.

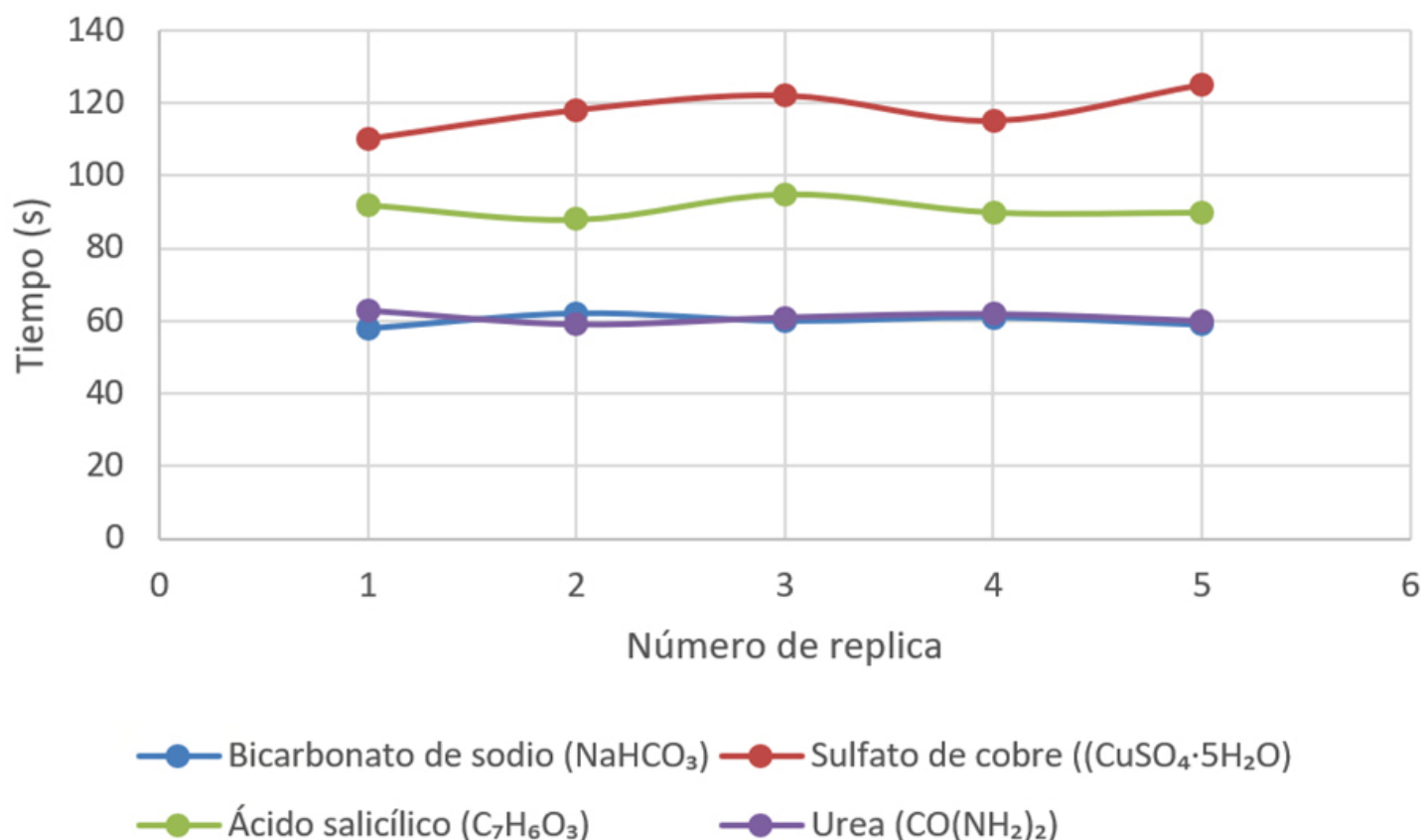


Gráfico 2. Distribución del tiempo de disolución (segundos) por réplica empleando el prototipo desarrollado

Para validar la contribución científica, se contrastaron las medias obtenidas con el prototipo frente a los tiempos registrados con el equipo comercial IKA VORTEX 2, como se ve en la tabla 3 y gráfi-

co 3. Los datos reflejan que la arquitectura focalizada del prototipo permite reducir los tiempos de preparación en más de un 50%.

Tabla 3. Comparativa de tiempos medios de disolución entre el prototipo y equipo comercial IKA.

Muestra	Media Prototipo (s)	Media IKA VORTEX 2 (s)	Reducción de tiempo (%)
Inorgánico Fino	60	195	69.23%
Inorgánico Grueso	118	280	57.86%
Orgánico Fino	91	225	59.56%
Orgánico Grueso	61	185	67.03%

Fuente: Elaboración propia a partir de datos experimentales obtenidos in situ.

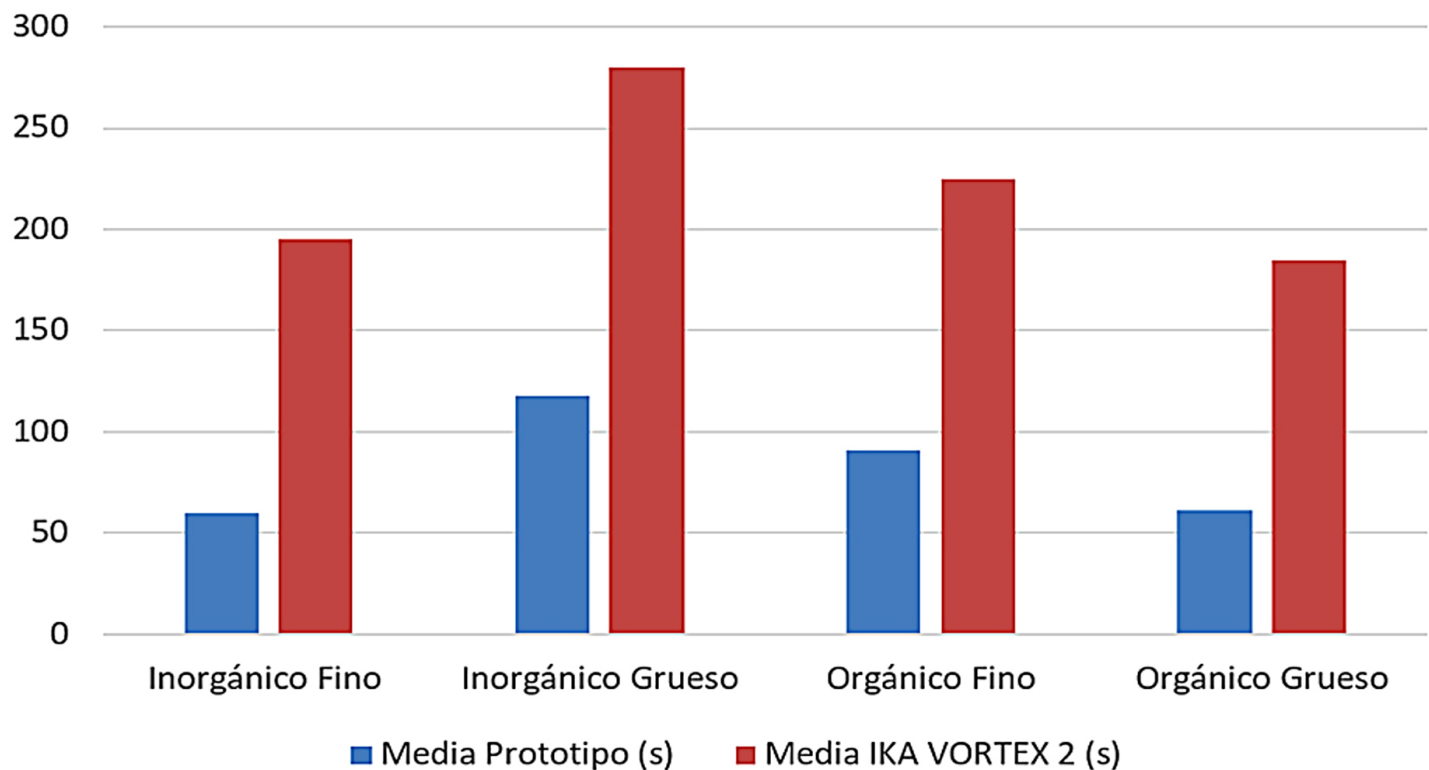


Gráfico 3. Visualización de las s por cada equipo utilizado.

Estos datos cuantitativos demuestran que, al encajar perfectamente en el diámetro del tubo, el equipo permite una agitación vigorosa y constan-

te sin someter al vidrio a tensiones de riesgo, logrando tiempos de 1 a 2 minutos frente a los 3 a 5 minutos del equipo comercial.

Resultados

La evaluación del prototipo frente a la homogeneización de los cuatro solutos representativos arrojó datos cuantitativos y cualitativos respecto a la cinética de disolución y la seguridad operativa del sistema. La aplicación secuencial del diseño experimental permitió monitorear la dinámica de fluidos y registrar los tiempos de disolución definitivos para cada ensayo realizado en los tubos de RMN de 5 mm.

En primer lugar, se evaluó la solubilización de la sal inorgánica fina correspondiente al bicarbonato de sodio (NaHCO_3). Al añadir el volumen de agua emulada, el material particulado presentó una tendencia a la aglomeración y a la compactación basal en la curvatura inferior del tubo. La activación del dispositivo, caracterizada por la transmisión de un radio de giro corto y controlado, generó la resuspensión inmediata del precipitado, dispersando el sólido depositado en la columna de fluido. El régimen turbulento continuo mantuvo las partículas en suspensión hasta alcanzar la transparencia óptica en un tiempo medio de 60.0 ± 1.58 segundos, superando la eficiencia cinética frente a los más de 180 segundos requeridos por un vórtex convencional y sin dejar cristales remanentes adheridos a las paredes del vidrio.

Posteriormente, se analizó el comportamiento hidrodinámico frente a una sal inorgánica gruesa, el sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Debido a la alta densidad del compuesto, los cristales se precipitaron de inmediato en el fondo del recipiente. Mientras que en los mezcladores convencionales

la elevación de estos sólidos resulta deficiente y exige periodos de agitación superiores a los 240 segundos, el acoplamiento del tubo con el cabezal de TPU del prototipo indujo una transferencia de energía mecánica que provocó colisiones interparticulares constantes sin exceder el módulo de elasticidad del vidrio de borosilicato. Este fenómeno mecánico aceleró la erosión del soluto, completando la disolución en un tiempo medio de 118.0 ± 5.87 segundos y evidenciando una transición cromática progresiva hacia una mezcla isotrópica en todo el volumen de 0.6 ml.

En la tercera fase de las pruebas, la evaluación con un compuesto orgánico fino, el ácido salicílico ($\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_3$), introdujo la variable de una alta tensión superficial. Esta propiedad provocó un comportamiento hidrofóbico inicial, manteniendo al material particulado en la interfase líquido-aire sobre el menisco del agua. El prototipo demostró su capacidad mecánica al generar un vórtice con la profundidad necesaria para inducir la succión continua del polvo flotante hacia el seno del líquido. Al superar esta barrera de tensión superficial, la solubilización se completó en un tiempo medio de 91.0 ± 2.65 segundos, mejorando el rendimiento frente a los lapsos de 180 a 300 segundos de los agitadores tradicionales y eliminando la necesidad de recurrir a la manipulación manual directa del tubo.

Finalmente, el análisis de la solubilización del compuesto orgánico grueso, constituido por urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), reveló un proceso de naturaleza endotérmica, detectado mediante una disminución térmica localizada en la superficie exterior del

tubo. Durante la agitación, los gradientes de concentración y los cambios de densidad del fluido generaron líneas de corriente visibles asociadas al efecto Schlieren a medida que se transfería la masa del cristal al disolvente. A pesar de las variaciones locales en la viscosidad del medio acuoso, la dinámica de mezcla del prototipo se mantuvo estable e ininterrumpida. La homogeneidad óptica total se alcanzó en un tiempo medio de 61.0 ± 1.58 segundos, lo que representa una reducción de tiempo sustancial respecto a la instrumentación convencional, como se ve en la figura 10.



Figura 10. Dispositivo con los tubos evaluados tras alcanzar la homogeneidad óptica total.

Ciclo de uso sugerido y factores de diseño de seguridad

Para garantizar la viabilidad del equipo, se estableció un ciclo de trabajo máximo de 10 minutos de operación continua por 15 minutos de reposo, previniendo la deformación térmica del PETG y el desgaste del motor. Estructuralmente, consi-

derando una fuerza operativa máxima de 25 N y el límite elástico del PETG impreso (45 MPa), el chasis presenta un factor de seguridad mecánico superior a 3.5. Electrónicamente, el MOSFET integrado (60 A) soporta holgadamente el consumo máximo del motor (<3 A), otorgando un factor de seguridad eléctrico de 20:1 que erradica riesgos de sobrecalentamiento.

Hallazgos y/o conclusiones

A partir del desarrollo, modelado computacional y validación experimental del prototipo, se concluye que el diseño paramétrico focalizado representa una optimización técnica significativa en la preparación de muestras para espectroscopía de Resonancia Magnética Nuclear. El dispositivo demuestra una eficiencia mecánica superior al reducir en más de un 50% los tiempos de disolución de solutos sólidos en comparación con la instrumentación comercial estandarizada. Esta mejora cinética se atribuye a la transferencia de energía constante y al mantenimiento de un régimen de agitación vigoroso en lapsos efectivos de uno a dos minutos, posibilitados por la geometría del cabezal adaptada a recipientes de diámetros estrechos.

El estudio confirma la erradicación del riesgo de fractura por estrés mecánico en los tubos de vidrio de borosilicato. La integración de un sistema motoriz de órbita estable junto con una interfaz elástica de poliuretano termoplástico (TPU) proporciona un coeficiente de amortiguación estructural que disipa las vibraciones laterales parásitas. Durante la totalidad de la fase experimental, el índice de

fallas mecánicas y rupturas de cristal fue nulo, validando la seguridad operativa del prototipo frente a los métodos de agitación convencionales.

Desde la perspectiva de la manufactura, el proyecto ratifica la viabilidad técnica y económica del hardware científico abierto (Open Labware). La impresión 3D de una carcasa monolítica utilizando termoplásticos de grado de ingeniería, como el tereftalato de polietileno glicol (PETG), se consolida como una alternativa robusta que provee una estabilidad estructural competitiva frente a equipos comerciales de alto costo. El sistema garantiza un control de micro-volúmenes que evita la pérdida de analito por salpicaduras y soluciona problemas de aglomeración basal, asegurando una solubilización isotrópica.

Finalmente, el dispositivo genera un impacto positivo en la calidad analítica de la RMN al facilitar el proceso de homogeneización del campo magnético (shimming). La capacidad de asegurar mezclas libres de gradientes de concentración y microburbujas permite la obtención de espectros con una mejor relación señal-ruido y una resolución estructural superior, eliminando las anisotropías magnéticas locales en la muestra. Como directriz para el desarrollo futuro, se contempla la ejecución de simulaciones de dinámica de fluidos computacional para modelar exhaustivamente la reología de las mezclas, así como el análisis de elementos finitos para refinar la topología estructural. Asimismo, la implementación de un análisis de ciclo de vida permitirá cuantificar el impacto ambiental de los polímeros seleccionados y proyectar la longevidad del equipo en entornos de alta demanda.

Símbolos

Re	Número de Reynolds (adimensional)	-
p	Densidad del fluido	(kg/m ³)
N	Velocidad de rotación	(s ⁻¹)
D	Diámetro interno del tubo	(m)
μ	Viscosidad dinámica	(Pa•s)
t_d	Tiempo de disolución	(s)
%M	Porcentaje de mejora cinética	(%)
TPU	Poliuretano Termoplástico	-
RMN	Resonancia Magnética Nuclear	-
D&F&M3D	Diseño, Fabricación y Modelado 3D	-
mm	milímetros	-
mL	mililitros	-
DC	Corriente Continua (Direct Current)	-
Hz	Hertz (Unidad de frecuencia)	-
PCB	Placa de Circuito Impreso (Printed Circuit Board)	-
SMD	Dispositivo de Montaje Superficial (Surface-Mount Device)	-
STL	Formato de archivo de estereolitografía (Standard Tessellation Language)	-
PETG	Tereftalato de Polietileno Glicol	-

Citas y referencias

- Anderson, C. (2012). Makers: The new industrial revolution. *Crown Business*.
- Anklin, C. (2017). Sample preparation of viscous materials in NMR. *ResearchGate*.
- Baden, T., Chagas, A. M., Gage, G., Marzullo, T., Prieto-Godino, L. L., & Euler, T. (2015). Open Labware: 3-D printing your own lab equipment. *PLoS Biology*, 13(3), e1002086. <http://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002086>
- Cárdenas Medina, M. D. J., Leyva, L., Calva-Yañez, J. C., & Chávez, D. (2026). Development and fabrication of a vortex mixer optimized (V.M.O.) for NMR tubes. *En Primer Congreso Internacional y Cuarto Congreso Nacional Multidisciplinario "Mujeres en la Ciencia" 2026*. Ciudad de México, México. <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.31645.58086>
- Claridge, T. D. W. (2016). High-resolution NMR techniques in organic chemistry. Elsevier.
- Ghoshal, A., & Kadam, R. (2020). Applications of 3D printing in analytical chemistry and sample preparation. *Journal of Analytical Methods*, 12(4), 567-580.
- Gutierrez, J. M. P., Hinkley, T., Taylor, J. W., Yanev, K., & Cronin, L. (2014). Evolution of oil droplets in a chemorobotic platform. *Nature Communications*, 5(1), 5571. <http://doi.org/10.1038/ncomms6571>
- Kitson, P. J., Macdonell, A., Tsuda, S., Zang, H., Long, D. L., & Cronin, L. (2014). Bringing crystal structures to reality by three-dimensional printing. *Crystal Growth and Design*, 14(6), 2720-2724. <http://doi.org/10.1021/cg5003012>
- Kuzio, N. J., Tonelli, M., & Fejzo, J. (2025). An NMR sample preparation case study. *Biomolecular NMR*, 14(2), e126.
- Microlit. (2025). Top 5 trends in science laboratory equipment in 2025. *Microlit Tech*.
- Fritz, N., Engelmann, G., & De Doncker, R. W. (2019). RC snubber design procedure for enhanced oscillation damping in wide-bandgap switching cells. *2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe)*, 1-10. <http://doi.org/10.23919/EPE.2019.8915541>
- Dryden, M. D. M., Fobel, R., Fobel, C., & Wheeler, A. R. (2017). Upon the shoulders of giants: open-source hardware and software in analytical chemistry. *Analytical Chemistry*, 89(8), 4330-4338. <http://doi.org/10.1021/acs.analchem.7b00485>
- Hsueh, M. H., Lai, C. J., Wang, S. H., Zeng, Y. S., Hsieh, C. H., Pan, C. Y., & Huang, W. C. (2021). Effect of printing parameters on the mechanical properties of 3D-printed PETG and TPU materials. *Polymers*, 13(19), 3364. <http://doi.org/10.3390/polym13193364>
- Bates, S. R. G., Kelly, I. R., & Kemp, B. J. (2016). 3D printed polyurethane honeycombs for repeated tailored energy absorption. *Materials & Design*, 112, 172-183. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.09.062
- MIT DCIF. (2018). Things to know before you begin operating an NMR. *Massachusetts Institute of Technology*.
- Munir, N. M., Mahmoudi, E., Chua, S. F., & Mohammad, A. W. (2026). 3D printing in the laboratory: Maximize time and funds with customized and open-source labware. *SLAS Technology*.
- Organomation. (2025). NMR sample preparation: The complete guide. *Organomation Technical Resources*.
- Pearce, J. M. (2013). Open-source lab: How to build your own hardware and reduce research costs. *Elsevier*.
- UCR ACIF. (2023). Safety and NMR tube breakage prevention. University of California, Riverside.
- Wong, A. P., Gupta, M., Shevkoplyas, S. S., & Whitesides, G. M. (2008). Egg beater as centrifuge: isolating human blood plasma from whole blood in resource-poor settings. *Lab on a Chip*, 8(12), 2032-2037. <http://doi.org/10.1039/b809830c>

