



Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
DR. JUAN MORALES CORONA
Jefe del Departamento de Física

CdMx a 11 de junio de 2025.

Asunto: Solicitud de Alta de Proyecto.

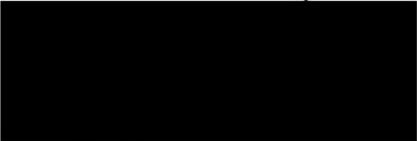
**DR. ROMÁN LINARES ROMERO
PRESIDENTE DEL CONSEJO DIVISIONAL
DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
PRESENTE**

Estimado Dr. Linares,
por este medio le solicito atentamente incluir como un punto del orden de día en la próxima sesión del Consejo Divisional que usted preside, la alta del proyecto del Área Académica de Física Teórica cuyo título es: **Estudio de Técnicas Teóricas para la Calibración y Uso de Pinzas Ópticas**, a cargo del Dr. Issac Pérez Castillo.

Sírvase encontrar en anexo, la documentación que complementa esta solicitud:

- El Documento que contiene la información del nuevo proyecto de investigación.
- Solicitud en evaluación del proyecto ante la SECIHTI, en el programa de Ciencia de Frontera.

La agradezco su atención y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración.



Casa Abierta al Tiempo

1. NOMBRE

Estudio de Técnicas Teóricas para la Calibración y Uso de Pinzas Ópticas.

2. NOMBRE DEL RESPONSABLE Y TIEMPO DE DEDICACIÓN AL PROYECTO

Nombre	Tiempo de dedicación
Dr. Isaac Pérez Castillo, Profesor Titular C de Tiempo Completo, Área Académica de Física Teórica.	10 horas

3. NOMBRE DE LOS PARTICIPANTES Y TIEMPO DE DEDICACIÓN AL PROYECTO

Nombre	Tiempo de dedicación
Dr. Isaac Pérez Castillo, Profesor Titular C de Tiempo Completo, Área Académica de Física Teórica.	10 horas

4. ÁREA, DEPARTAMENTO Y DIVISIÓN

Área Académica de Física Teórica, Departamento de Física, División de Ciencias Básicas e Ingeniería.

5. OBJETIVOS GENERALES Y PARTICULARES

A continuación describimos los objetivos del presente proyecto de investigación.

Conforme se expanden los usos de las pinzas ópticas y se involucran una variedad creciente de fenómenos, mantener la robustez de los datos experimentales se torna un desafío creciente. Esto se debe a una serie de factores, como la medición de fuerzas de magnitud cada vez menor, la variabilidad temporal en la rigidez de la trampa, la disminución en la duración de las trayectorias y la posibilidad de que los potenciales no sean siempre armónicos, incluyendo casos con potenciales altamente complejos. Adicionalmente, el estudio de materia viva mediante pinzas ópticas también puede presentar retos adicionales, dado que las condiciones del fluido circundante pueden no ser ideales y la calidad de las imágenes puede verse afectada por la falta de homogeneidad en el tejido vivo, lo cual influye en la integridad de los datos.

Tomando en consideración estas razones fundamentales, el propósito central de este proyecto es investigar y elaborar modelos matemáticos más robustos, así como implementar algoritmos estadísticos más efectivos para la calibración de pinzas ópticas. Estos avances tendrán la capacidad de extraer información más significativa de conjuntos de datos experimentales que presenten las limitaciones previamente señaladas.

En este proyecto, nos proponemos alcanzar los siguientes objetivos específicos:

1. Implementar la inferencia bayesiana como herramienta para la calibración de pinzas ópticas.
2. Ampliar los enfoques de calibración considerando situaciones experimentales más cercanas a la realidad, tales como:
 - Incluir tiempos de resolución y adquisición finitos.
 - Abordar el régimen subamortiguado.
 - Considerar fuerzas no conservativas.
 - Evaluar fluidos viscoelásticos.
 - Analizar fluidos con un kernel de memoria que resulte en movimiento browniano fraccionario.

3. Explorar alternativas de métodos probabilísticos para la calibración, como por ejemplo:

- Emplear el espectro de densidad de potencias para trayectorias individuales y aplicar la inferencia bayesiana utilizando la distribución de probabilidad de dicho observable. Por supuesto, este nuevo método se puede extender a los casos mencionados anteriormente.

6. ANTECEDENTES

En 1970, Arthur Ashkin logró demostrar que un rayo láser enfocado tiene la capacidad de acelerar, desacelerar e incluso atrapar partículas neutras de tamaño micrométrico de manera estable [1]. Posteriormente, en 1986, junto con sus colegas, Ashkin logró la primera implementación exitosa de las pinzas ópticas: un haz de luz altamente enfocado capaz de sostener partículas microscópicas en tres dimensiones [2, 3]. Estos avances valieron a Ashkin el reconocimiento con una porción del Premio Nobel de Física en 2018. Además, Steven Chu, uno de los coautores de Ashkin, aplicaría las pinzas ópticas para enfriar y atrapar átomos, lo que contribuyó a que Chu recibiera una parte del premio Nobel de Física en 1997 [4].

A finales de la década de 1980, Ashkin y su equipo comenzaron a emplear las pinzas ópticas para manipular muestras biológicas, incluyendo un virus del mosaico del tabaco y la bacteria *Escherichia coli*. Luego, en 1993, Lucien Ghislain y Watt Webb idearon la microscopía de fuerza fotónica, en la cual una partícula atrapada ópticamente funciona como una sonda extremadamente sensible para medir fuerzas microscópicas que abarcan desde femtonewtons hasta piconewtons. A partir de principios de la década de 1990, la espectroscopía de fuerza óptica se ha empleado para caracterizar las propiedades mecánicas de biomoléculas y motores biológicos. Las aplicaciones de las pinzas ópticas se extienden a diversos campos como física, biología, química, y más concretamente, nanotecnología, espectroscopía, nanotermodinámica, materia blanda, física estadística, fenómenos de transporte, propiedades mecánicas de fluidos complejos e incluso mecánica cuántica [5–27].

Brevemente, las pinzas ópticas se construyen a partir de un rayo láser enfocado a través de un objetivo de microscopio de alta apertura numérica (NA). Una partícula microscópica (cuyo índice de refracción suele ser mayor que el del medio circundante) puede quedar atrapada cerca del punto focal debido a la interacción de fuerzas ópticas de dispersión y gradiente: las fuerzas de dispersión surgen de la presión de radiación del haz de luz y se orientan a lo largo de la dirección de propagación del rayo, mientras que las fuerzas del gradiente empujan la partícula hacia el punto focal de alta intensidad [20]. El uso de pinzas ópticas permite la captura de una amplia gama de partículas.

En una primera aproximación, una trampa óptica puede ser modelada como una fuerza microscópica de tipo Hooke con una constante de rigidez fija. Esto implica que la fuerza restauradora es proporcional al desplazamiento de la partícula atrapada ópticamente desde el centro de la trampa. Matemáticamente, esta fuerza se expresa como $F = -\kappa(x - x_{\text{eq}})$, donde κ representa la rigidez de la trampa óptica y x_{eq} es el punto de equilibrio estable. Calibrar las pinzas ópticas involucra determinar el valor de κ , el cual generalmente depende de las propiedades tanto del haz de luz como de la partícula. El análisis del movimiento térmico de la partícula atrapada en el potencial armónico proporciona información sobre las fuerzas locales que actúan sobre ella. Por consiguiente, calibrar las pinzas ópticas es esencial para emplearlas como transductores de fuerza microscópicos, es decir, para medir y aplicar fuerzas en el rango de femtonewtons y piconewtons.

Existen diversas maneras de determinar experimentalmente la rigidez de la trampa. La mayoría de estos métodos se fundamentan en el seguimiento de la posición de la partícula a lo largo del tiempo, generalmente capturada mediante una cámara digital o un fotodiodo de cuadrante [20, 28–31]. A partir de la trayectoria estocástica, se emplean diversos estimadores estadísticos para calcular tanto la rigidez de la trampa óptica como la constante de difusión de la partícula atrapada ópticamente [21]. Estos métodos de calibración se dividen en pasivos y activos. Los enfoques pasivos emplean información acerca de la trayectoria browniana de una partícula atrapada en unas pinzas ópticas estáticas. Por otro lado, los métodos activos examinan la reacción de la partícula ante una perturbación conocida inducida por una fuerza externa. La fuerza ejercida por las pinzas ópticas también puede determinarse directamente midiendo cómo se dispersa la luz atrapada a través de una cámara digital o un fotodetector (para más detalles sobre estos métodos, véase [21]). Alternativamente, en las siguientes secciones presentamos una breve introducción a los métodos de calibración pasivos. Por ejemplo, el método de equipartición estima κ basándose en el hecho de que, en equilibrio termodinámico, la distribución de probabilidad de la posición de la partícula sigue la distribución de Boltzmann [20, 21, 31]. Otros métodos pueden adicionalmente calcular la constante de difusión basándose en el desplazamiento cuadrático medio [20], la función de autocorrelación [32], la densidad espectral de potencia [33], o realizando una reconstrucción de fuerzas mediante estimadores de máxima verosimilitud (conocido como método FORMA) [21, 34]. En términos generales, la calibración exacta y precisa de las pinzas ópticas dependerá de varios parámetros relacionados con la detección de la posición de la partícula, como la relación señal-ruido, la frecuencia de

-
- [1] A. Ashkin, *Phys. Rev. Lett.* **24**, 156 (1970).
 - [2] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, and S. Chu, *Opt. Lett.* **11**, 288 (1986).
 - [3] A. Ashkin, "Optical trapping and manipulation of neutral particles: A reprint volume with commentaries," (2006).
 - [4] S. Chu, *Reviews of Modern Physics* **70**, 685 (1998).
 - [5] S. M. Block, L. S. Goldstein, and B. J. Schnapp, *Nature* **348**, 348 (1990).
 - [6] C. Bustamante, J. F. Marko, E. D. Siggia, and S. Smith, *Science* **265**, 1599 (1994).
 - [7] J. T. Finer, R. M. Simmons, and J. A. Spudis, *Nature* **368**, 113 (1994).
 - [8] D. G. Grier, *nature* **424**, 810 (2003).
 - [9] K. Dholakia and P. Zemanek, *Reviews of modern physics* **82**, 1767 (2010).
 - [10] K. Dholakia and T. Čizmar, *Nature photonics* **5**, 335 (2011).
 - [11] M. L. Juan, M. Righini, and R. Quidant, *Nature photonics* **5**, 349 (2011).
 - [12] M. Padgett and R. Di Leonardo, *Lab on a Chip* **11**, 1196 (2011).
 - [13] M. Padgett and R. Bowman, *Nature photonics* **5**, 343 (2011).
 - [14] O. M. Marago, P. H. Jones, P. G. Gucciardi, G. Volpe, and A. C. Ferrari, *Nature nanotechnology* **8**, 807 (2013).
 - [15] D. V. Petrov, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* **9**, S139 (2007).
 - [16] I. A. Martínez, É. Roldán, L. Dinis, and R. A. Rica, *Soft matter* **13**, 22 (2017).
 - [17] J. Gieseler and J. Millen, *Entropy* **20**, 326 (2018).
 - [18] R. M. Robertson-Anderson, "Optical tweezers microrheology: from the basics to advanced techniques and applications," (2018).
 - [19] F. M. Fazal and S. M. Block, *Nature photonics* **5**, 318 (2011).
 - [20] P. H. Jones, O. M. Maragò, and G. Volpe, *Optical Tweezers: Principles and Applications* (Cambridge University Press, 2015).
 - [21] J. Gieseler, J. R. Gomez-Solano, A. Magazzù, I. P. Castillo, L. P. García, M. Gironella-Torrent, X. Viader-Godoy, F. Ritort, G. Pesce, A. V. Arzola, K. Volke-Sepúlveda, and G. Volpe, *Adv. Opt. Photon.* **13**, 74 (2021).
 - [22] G. e. a. Volpe, *Journal of Physics: Photonics* (2023).
 - [23] C. Bustamante, W. Cheng, and Y. X. Mejia, *Cell* **144**, 480 (2011).
 - [24] P. Zemanek, G. Volpe, A. Jonáš, and O. Brzobohatý, *Advances in Optics and Photonics* **11**, 577 (2019).
 - [25] P. Roca-Cusachs, V. Conte, and X. Trepat, *Nat. Cell Biol.* **19**, 742 (2017).
 - [26] C. Gonzalez-Ballester, M. Aspelmeyer, L. Novotny, R. Quidant, and O. Romero-Isart, *Science* **374**, eabg3027 (2021).
 - [27] M. Tassieri, F. D. Giudice, E. J. Robertson, N. Jain, B. Fries, R. Wilson, A. Glidle, F. Greco, P. A. Netti, P. L. Maffettone, *et al.*, *Scientific reports* **5**, 8831 (2015).
 - [28] J. C. Crocker and D. G. Grier, *Journal of colloid and interface science* **179**, 298 (1996).
 - [29] A. Pralle, M. Prummer, E.-L. Florin, E. Stelzer, and J. Hörber, *Microscopy Research and Technique* **44**, 378 (1999).
 - [30] G. Pesce, P. H. Jones, O. M. Maragò, and G. Volpe, *The European Physical Journal Plus* **135**, 1 (2020).
 - [31] K. C. Neuman and S. M. Block, *Review of scientific instruments* **75**, 2787 (2004).
 - [32] G. Volpe, G. Volpe, and D. Petrov, *Phys. Rev. E* **76**, 061118 (2007).
 - [33] K. Berg-Sørensen and H. Flyvbjerg, *Review of Scientific Instruments* **75**, 594 (2004).
 - [34] L. Pérez García, J. Donlucas Pérez, G. Volpe, A. V. Arzola, and G. Volpe, *Nature Communications* **9**, 5166 (2018).

7. DESCRIPCIÓN

Las pinzas ópticas forman parte de una categoría de técnicas denominadas espectroscopia de fuerzas fuera del equilibrio. Estas pinzas tienen la capacidad de atrapar partículas micrométricas, lo que posibilita la exploración de diversos sistemas de interés. En esencia, las pinzas ópticas funcionan como transductores de fuerza, al transmitir fuerzas en el rango que va desde femtonewtons hasta piconewtons a sistemas físicos diminutos, permitiendo manipularlos y comprender sus propiedades. Desde su creación en 1986 por Arthur Ashkin y sus colegas, estas pinzas se han convertido en herramientas esenciales en múltiples campos como la física, espectroscopia, biología, nanotecnología y termodinámica, entre otros.

No obstante, para emplear las pinzas ópticas de manera efectiva como transductores de fuerza, es imperativo llevar a cabo una calibración precisa en primer lugar. Este proceso abarca la deducción de las características del potencial de atrapamiento óptico y las propiedades inherentes a la partícula capturada.

En la actualidad, se dispone de una variedad de métodos de calibración. El objetivo primordial de este proyecto de investigación radica en comprender, mejorar e innovar los métodos de calibración existentes, además de incorporar elementos más realistas de los experimentos que involucran las pinzas ópticas.

8. RECURSOS DISPONIBLES PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO

El proyecto requiere del uso de equipo de cómputo para la resolución de ecuaciones numéricas. Estos recursos de cómputo están disponibles para el Área de Física Teórica y el Departamento de Física o se pueden conseguir por medio del financiamiento. Actualmente, se cuenta con recursos humanos para desarrollar el proyecto y se ha enviado un proyecto de Ciencia Básica y Frontera.

9. INFRAESTRUCTURA ACTUAL EN LA UNIVERSIDAD DISPONIBLE PARA EL PROYECTO

La Universidad tiene disponible equipo de cómputo para la resolución de los cálculos numéricos relevantes al proyecto y también presupuesto para la asistencia a congresos científicos.

10. FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Se encuentra en evaluación una solicitud de financiamiento ante Ciencia Básica y Frontera SECIHTI, lo cual fortalecerá la implementación.

11. INDICADORES DE DESEMPEÑO

A continuación, enumeramos los resultados entregables para el proyecto de investigación, que se llevará a cabo durante un período de 3 años:

- **Artículos de investigación (3 en total):** A lo largo del proyecto, planeamos publicar un total de 9 artículos de investigación. Estos artículos abordarán diversas áreas relacionadas con las pinzas ópticas y sus aplicaciones, así como temas adyacentes. Esperamos publicar 1 artículos por etapa. Posibles líneas de investigación tentativos de los cuales surgirían dichos artículos serían:
 1. *Inferencia Bayesiana con priors conjugados para la calibración de pinzas ópticas.*
 2. *Calibración óptima de pinzas ópticas con tiempo de integración y frecuencias de muestreo arbitrarias en el régimen subamortiguado: un marco general.*
 3. *Análisis espectral multi-frecuencia de una partícula browniana en un potencial armónico mediante trayectorias individuales.*
 4. *Análisis espectral multi-frecuencia de una partícula browniana en presencia de fuerzas no conservativas mediante trayectorias individuales.*
 5. *Análisis espectral multi-frecuencia de una partícula browniana en un potencial armónico en el régimen subamortiguado mediante trayectorias individuales.*
 6. *Inferencia Bayesiana para la calibración de pinzas ópticas a través de la distribución de probabilidad de la densidad espectral de potencia de trayectorias individuales.*
 7. *Teorema de fluctuación generalizado de Crooks para trayectorias borrosas.*
 8. *Teoría de transición de Kramers en paisajes energéticos con carga topológica.*
 9. *La densidad espectral de potencia de una trayectoria individual borrosa de una partícula browniana en un potencial armónico.*
- **Formación de recursos humanos:** Nuestra visión incluye la formación de recursos humanos en temas relacionados con este proyecto de investigación y áreas afines:
 1. Dos estudiantes de servicio social ayudando en temas de documentación técnica de software generado, ayudando a simulaciones y resultados numéricos.
 2. Dos estudiantes de licenciatura a través de proyectos terminales. Los estudiantes realizarán proyectos basados o extendiendo los resultados teóricos obtenidos a lo largo de proyecto.
 3. Un estudiante de maestría realizará sus tesis durante las etapas 2 y 3 del proyecto.

- **Presentación de resultados en eventos:** Planeamos presentar nuestros resultados en eventos tanto a nivel nacional como internacional. La participación en conferencias y simposios nos permitirá compartir nuestros avances y obtener retroalimentación valiosa. Estos se llevarán a cabo durante las etapas 2 y 3 de este proyecto.
- **Actividades de divulgación:** Reconocemos la importancia de la divulgación científica. Planeamos llevar a cabo actividades de divulgación para acercar nuestros avances y conocimientos a la comunidad en general, inspirando un mayor interés en la ciencia. Esto incluiría organización de visitas de colegas a nuestra universidad, además de generar artículos de divulgación, o participar en conferencias de divulgación.

Estos resultados entregables reflejan nuestra ambiciosa visión y nuestro compromiso con la investigación interdisciplinaria y la formación de nuevas generaciones de científicos. Presentamos los indicadores de desempeño en la siguiente tabla:

Componente	Productos de trabajo	Cantidad
Investigación	Artículos en revistas indexadas	3
	Presentaciones en congresos	3
Docencia	Asesoría en proyectos terminales	2
	Dirección de estudiantes de maestría	1
Preservación y difusión de la cultura	Conferencias/artículos de divulgación	3
	Asesoría de servicios sociales	2

12. FECHA DE INICIO, DURACIÓN Y PLANEACIÓN A TRES AÑOS

El proyecto se desarrollará en tres etapas de 12 meses cada una, con objetivos bien definidos: teoría y simulación en condiciones ideales (Etapa 1), extensión a contextos experimentales realistas (Etapa 2), y consolidación formal y validación externa (Etapa 3). Las actividades incluyen investigación teórica, implementación computacional, validación estadística, colaboración internacional y formación de recursos humanos. La fecha de inicio será el trimestre 25-O.

A continuación, se detalla el cronograma de actividades clave:

• Primer Año. Octubre 2025 a octubre 2026. Trimestres 25-O, 26-I, 26-P

Actividades:

- Revisión bibliográfica del estado de la cuestión
- Formulación teórica y simulación Monte Carlo bajo condiciones ideales
- Desarrollo de métodos bayesianos: MAP, MLE y promedio posterior
- Análisis del impacto de los priors y comparación con FORMA/BEFORE
- Prototipo funcional en Python para simulación y estimación

Entregables:

- Un artículo científico
- Un artículo de divulgación
- Presentación en congresos u otro tipo de eventos

• Segundo Año. Octubre 2026 a octubre 2027. Trimestres 26-O, 27-I, 27-P

Actividades:

- Revisión bibliográfica del estado de la cuestión
- Prototipo funcional en Python para simulación y estimación
- Generalización a régimen subamortiguado y fuerzas no conservativas
- Inferencia bayesiana sobre la PSD individual como variable aleatoria
- Implementación de software avanzado con validación sobre datos reales

Entregables:

- Un artículo científico

- Un artículo de divulgación
- Un estudiante de servicio social
- Un proyecto terminal
- Dirección de un estudiante de maestría
- Presentación en congresos u otro tipo de eventos

• **Tercer Año. Octubre 2027 a octubre 2028. Trimestres 27-O, 28-I, 28-P**
Actividades:

- Revisión bibliográfica del estado de la cuestión
- Implementación de software avanzado con validación sobre datos reales
- Análisis teórico de trayectorias individuales borrosas
- Estudio formal de teoremas de fluctuación en condiciones no ideales

Entregables:

- Un artículo científico
- Un artículo de divulgación
- Un estudiante de servicio social
- Un proyecto terminal
- Dirección de un estudiante de maestría
- Presentación en congresos u otro tipo de eventos

Presentamos también las actividades y entregables en forma de tabla:

Actividad	Año 1	Año 2	Año 3
Formulación teórica y simulación Monte Carlo bajo condiciones ideales	✓		
Desarrollo de métodos bayesianos: MAP, MLE y promedio posterior	✓		
Análisis del impacto de los priors y comparación con FORMA/BEFORE	✓		
Prototipo funcional en Python para simulación y estimación	✓	✓	
Generalización a régimen subamortiguado y fuerzas no conservativas		✓	
Inferencia bayesiana sobre la PSD individual como variable aleatoria		✓	
Implementación de software avanzado con validación sobre datos reales		✓	✓
Análisis teórico de trayectorias individuales borrosas			✓
Estudio formal de teoremas de fluctuación en condiciones no ideales			✓
Entregables			
Redacción y publicación de un artículo científico	✓		
Redacción y publicación de un artículo científico		✓	
Redacción y publicación de un artículo científico			✓
Redacción de artículos de divulgación científica	✓	✓	✓
Participación en congresos nacionales e internacionales	✓	✓	✓
Supervisión de dos estudiantes de servicio social		✓	✓
Dirección de un estudiante de maestría (graduación y formación)		✓	✓
Difusión de resultados en seminarios nacionales e internacionales	✓	✓	✓

13. PALABRAS CLAVE

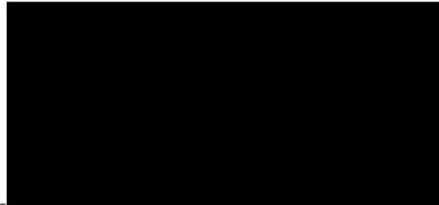
Pinzas ópticas, técnicas de calibración, inferencia Bayesiana, series de tiempo.



Dr. Isaac Pérez Castillo
Responsable Técnico, Profesor Titular C.T.C.
Coordinador del Tronco General de Física
Departamento de Física, División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I)



Dr. Miguel Ángel Bastarrachea Magnani
Jefe del Área de Física Teórica
Departamento de Física, División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I)



Dr. ~~Juan~~ Morales Corona
Jefe Departamento de Física
Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I)



Dr. Román Linares Romero
Director de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I)