

Enseñanza de la Física a través de Experimentos

7 de noviembre de 2023

1. Resumen

Este documento parte de una evaluación de los cursos de Física Experimental que se imparten en la carrera de Física, de la Facultad de Ciencias de la UNAM, de acuerdo a una serie de objetivos que se propusieron en el marco del Proyecto PAPIIT PE111020 con título "Enseñanza de la Física a través de proyectos experimentales". Se discuten propuestas basadas en proyectos experimentales para complementar los programas basados en prácticas pre-diseñadas. Los proyectos, propuestas y ejemplos son parte de los contenidos de la página del [Laboratorio de Fluidos](#) y del [Taller de Hidrodinámica y Turbulencia](#) de la Facultad de Ciencias de la UNAM.

2. Antecedentes

Las clases de Laboratorio dentro de la carrera de Física en la Facultad de Ciencias de la UNAM, están basadas en prácticas que han sido previamente diseñadas y probadas. Este esquema tiene la ventaja de que los experimentos propuestos se desarrollen adecuadamente y se pueda elaborar un reporte que cumple con las hipótesis y los objetivos planteados originalmente.

Sin embargo, en la práctica, este tipo de prácticas muchas veces no considera el material disponible en el Laboratorio y, en la mayoría de los casos, no contempla alternativas cuando algunos de los componentes no están disponibles o están en mal funcionamiento. Sin mencionar que muchas de ellas requieren una revisión, tomando en cuenta el avance de las computadoras y la tecnología actual.

Además, es importante notar que aunque en muchos casos los objetivos de cada práctica están planteados dentro de sus diseños, creemos que falta aclarar el objetivo por parte del profesor en cada práctica; qué se busca que el estudiante aprenda en cada experiencia. Por ejemplo, cuando el objetivo de un experimento es medir de manera indirecta una cierta cantidad Física (como la gravedad o alguna constante fundamental) no siempre está claro qué es lo que se espera que adquiera el estudiante, si lo que debe hacer es seguir una receta con el objetivo de medir algo que se contrasta con un valor sacado de un libro o una tabla y nada más.

Por otro lado, dentro del plan de estudios actual para la carrera de Física, las clases de teoría se separaron de las de laboratorio en vista que no había mucha coordinación entre ellas. Esto ha repercutido en que son materias sin una clara relación y por ello se consideran cursos diferentes con objetivos diferentes. Además, el tipo de prácticas en el laboratorio están usualmente enfocadas en probar diferentes resultados que salen de la teoría o simplemente medir cantidades físicas usando algún método (como por ejemplo constantes fundamentales). Esta separación entre la teoría y el laboratorio ha motivado a que dentro de las clases teóricas profesores propongan pequeños proyectos experimentales como parte de las actividades de algunos cursos. Con esta base se planteó el proyecto "Enseñanza de la Física a través de experimentos" como una propuesta para incluir pequeños proyectos teóricos, experimentales y numéricos que se pueden proponer tanto en clases de teoría como de laboratorio y que permitan al estudiante conocer y entender la relación entre ellas.

3. Propuestas de proyectos

Para los diferentes proyectos hemos propuesto que en las prácticas experimentales hay tres objetivos muy importantes. El primero es el diseño de experimentos que permitan aprender y entender conceptos fundamentales de cada disciplina y su relación con la teoría correspondiente. Por ejemplo, se proponen algunos experimentos de caída de un cuerpo (o varios cuerpos acoplados) en un ambiente de presión variable de manera que el estudiante haga observaciones sobre la relación del movimiento observado en el laboratorio (en donde se puede variar la fricción sobre el cuerpo) con la caída libre que se estudia en la teoría. Para este fin, el estilo de las prácticas que se utilizan en los Laboratorios actualmente se pueden adaptar, ajustando los objetivos de

manera que al final las conclusiones que se espera encontrar sean congruentes con el objetivo de entender conceptos de la Física desde el experimento. En el ejemplo de caída con fricción, por un lado la idea es entender el hecho de que todos los cuerpos caen igual independientemente de su masa, al disminuir la fuerza de fricción variando la forma del proyectil o la presión exterior. Por otro lado, permitirá desarrollar el concepto de "Aproximación"; en el ejemplo de la gravedad, al disminuir las fuerzas de resistencia el resultado debe aproximarse de forma asintótica al resultado obtenido por la ley de caída libre.

Un segundo objetivo de los proyectos es el diseño experimental, es decir, una vez que se tiene claro el objeto de estudio o la medida que se quiere realizar, guiar al estudiante en el diseño del dispositivo experimental: el material que se requiere y los instrumentos de medición más adecuados. En esta parte hay varios objetivos que se deben cubrir. Para elegir los instrumentos de medición hay que tener un cierto conocimiento de los diferentes instrumentos disponibles. En esta parte uno de los objetivos es el uso y cálculo de incertidumbres, que está íntimamente relacionado con los aparatos de medición elegidos y su uso. Por otro lado, diseñar los aparatos o los métodos de medición en caso que el experimento lo requiera.

El tercer gran objetivo, que está estrechamente relacionado con los anteriores, es el tipo de análisis de datos que se debe realizar de acuerdo con los objetivos planteados originalmente, que en muchas ocasiones, lleva a replantear la metodología original. Por un lado, para realizar un experimento hay que comprender conceptos asociados con la Física de los diferentes instrumentos de medición y su interacción con el experimento. Por ejemplo, en Dinámica de Fluidos, es común utilizar partículas sólidas como trazadores con la finalidad de estimar la velocidad de diferentes partes del fluido. Para ello, es necesario estudiar y conocer algunas de las propiedades de las partículas sólidas utilizadas y su interacción con el fluido. En el caso de los laboratorios de Teoría Cuántica, es muy importante desarrollar el concepto de medición y su debida interpretación.

Para esta parte se han planteado también proyectos numéricos basados en simuladores que resuelven un conjunto de ecuaciones diferenciales que representa algún problema en Física. La idea es generar suficientes datos a partir de simulaciones numéricas que después se analizan como si fueran experimentos reales con el objetivo de entender diferentes cosas. Desde los procesos inherentes en el fenómeno que se está estudiando que no son evidentes de la teoría o modelo utilizados debido a su complejidad matemática. Por ejem-

plo, hemos propuesto y estudiado las fuerzas y torcas hidrodinámicas que siente un sólido que enfrenta un flujo en diferentes circunstancias, en donde se ha estudiado los mecanismos de nado y se trabaja en modelar las fuerzas que ocurren sobre un cuerpo rígido debido al flujo: estos dos estudios están basados en el fenómeno conocido como Vibraciones Inducidas por Vórtices.

Se han propuesto proyectos por parte de los estudiantes para resolver numéricamente problemas de Mecánica Clásica representados por sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias lineales y no lineales. En este caso, la idea principal es aprender el uso de diferentes métodos numéricos, que resultan muy útiles dentro del laboratorio, para estimar de forma indirecta variables que no se pueden medir directamente. Por ejemplo, para medir las tres componentes del campo de velocidades en un fluido con PIV (por sus siglas en inglés *Particle Image Velocimetry*), primero se miden dos componentes en un plano fijo y después se infiere la tercera componente usando algún método numérico y alguna propiedad como la incompresibilidad de un flujo.

3.1. Aprender a través de experimentos

Para este objetivo los proyectos pueden partir de contestar una pregunta a través de un experimento o hacer demostraciones con experimentos previamente preparados. En unos casos se pueden usar prácticas elaboradas previamente con experimentos propuestos con el objetivo de hacer la observación de algún fenómeno, medir alguna constante de la física o encontrar el comportamiento de algunas cantidades físicas de interés al realizar muchas repeticiones de un mismo experimento. Las preguntas se deben sugerir por el docente que debe hacer propuestas sobre los temas específicos que cubre el plan de estudios correspondiente.

Las propuestas que hemos hecho hasta ahora en esta dirección involucran experimentos de caída de cuerpos de diferente geometría variando las fuerzas de resistencia, condensación y evaporación de agua a temperatura ambiente, dispersión de ondas, películas delgadas de fluidos compuestos y visualización de vórtices en flujos producidos por diferentes agentes: propulsión magnética y vibraciones inducidas por vórtices.

3.1.1. Proyectos conceptuales

- a) *Cámara de presión variable*: Se construyó una cámara prototipo en donde se puede variar la presión para realizar experimentos de caída libre con fricción variable. Se han propuesto varios proyectiles con diferentes propiedades (masa, geometría) y se tienen preparados algunos dispositivos para liberarlos dentro de la cámara. Los experimentos que se plantean están dirigidos a mostrar los agentes involucrados en la caída de un cuerpo, o varios cuerpos acoplados, en el laboratorio. Por una lado, se busca predecir el comportamiento cuando las fuerzas de restricción se hacen pequeñas (y en el límite cero) y obtener el resultado para la caída libre. Por otro lado, estudiar la dependencia de las fuerzas de fricción cuando éstas son importantes, por ejemplo, en el flujo de fluidos viscosos alrededor de cuerpos de diferente geometría.
- b) *Mini-Cámara de vacío*: Este grupo de experimentos consiste en hacer diferentes observaciones de fenómenos que ocurren dentro de una pequeña cámara de vacío, en donde se puede evacuar el aire en un 60-70 % con un mecanismo muy simple de dos válvulas unidireccionales y una jeringa. El objetivo principal es entender los fenómenos de condensación y de evaporación a través de experimentos a temperatura constante. Los otros materiales propuestos son un globo, agua gasificada y agua. La idea principal es que el estudiante entienda el efecto de disminuir la presión al inflar el globo dentro de la cámara; como primer experimento.

El segundo experimento consiste en extraer el gas del agua carbonatada al introducirla en la cámara, produciendo grandes burbujas al disminuir la presión. Los conceptos importantes en este caso involucran la separación entre el gas y el líquido formando burbujas, la tensión superficial y las analogías con el caso del globo. La tercera experiencia consiste de evaporar agua a temperatura ambiente y, al igual que el caso anterior, contrastarla con los experimentos anteriores. En este último experimento hay varias cosas interesantes de observar y contrastar y que ayudan a introducir varios nuevos conceptos. Por un lado está la generación de burbujas por evaporación y su crecimiento en analogía con los experimentos anteriores. Así como entre el gas de CO_2 y el agua se forma una superficie que tiene tensión superficial, en analogía con la tensión del globo, también cuando hay coexistencia entre dos fases se

forma una superficie que tiene tensión superficial.

Por otro lado, en este experimento se puede observar al disminuir la presión la formación de micro burbujas en el líquido y micro-gotas en las paredes de la cámara. Esto se debe a que al agua evaporada pasa a la cámara, una parte es evacuada inmediatamente por la jeringa y otra se condensa en las paredes por el contacto. Si se permite un cambio de presión abrupto dentro de la cámara este efecto se aumenta. Todas estas experiencias le permiten al estudiante hacer hipótesis de qué pasaría si ahora, con los mismos materiales, se aumenta la presión dentro de la cámara y, así inferir la formación de estructuras cristalinas a alta presión.

- *Ondas Someras*: Dentro del Laboratorio de Fluidos, del Dpto. de Física en la Facultad de Ciencias de la UNAM, se tiene un tanque para generar ondas en aguas someras. Se tiene un conjunto de diferentes geometrías (secciones de esferas, elipsoides y cilindros, etc.) que se pueden utilizar para modificar el fondo del tanque y hacer observaciones de ondas superficiales no lineales y cómo se dispersan debido a la batimetría. Durante el Servicio Social de la estudiante Maricruz Rosas se le acoplaron dos sistemas de visualización uno lateral y uno paralelo a la superficie libre del tanque. En este tanque se pueden hacer observaciones de diferentes tipos de ondas, desde ondas de gravedad cortas y largas, olas en la aproximación de aguas someras, dispersión debido a la batimetría, etc.
- *Ondas en un canal angosto*: Se construyó un canal angosto para observar ondas no lineales en aguas someras. A diferencia del caso anterior es un canal más pequeño en donde los efectos de borde pueden ser muy importantes. Este sistema está planteado para exhibir un sistema que no tiene una clara teoría que incluya efectos de borde debidos a la viscosidad del fluido. Además, resulta un sistema muy adecuado para mostrar rompimiento de olas, escalones hidráulicos, etc.

3.2. Diseño experimental

Una parte muy importante de la formación experimental, que en muchos cursos actuales se deja de lado, es el diseño experimental. Cuando la propuesta experimental surge de contestar alguna pregunta o de alguna observación

que surge de algún otro experimento es común que la metodología a seguir deba replantearse o requiere de algún dispositivo de medición adicional.

- a) *Fricción*: Utilizando los prototipos para realizar los experimentos más dirigidos, el estudiante puede plantear nuevos experimentos para estudiar fenómenos alternativos que se observaron en las prácticas más conceptuales. Por ejemplo, hacer un estudio más detallado de la fricción que siente un cuerpo cuando se desplaza dentro de un fluido viscoso y sus causas; cuando los efectos del contenedor puedan ser importantes o cómo se modifica esta fuerza de fricción cuando hay más de un cuerpo involucrado en el problema. Es importante notar que estas fuerzas en general no se pueden obtener de desarrollos teóricos generales, más bien depende de modelos *ad hoc* que dependen de parámetros que se ajustan en experimentos.
- b) *Dispersión de ondas*: El tanque de olas someras que está en el Laboratorio de Fluidos está en la fase de instrumentación, es decir, las olas ya se pueden generar y ya está parcialmente caracterizadas. Ahora se están instalando sistemas para colocar cámaras móviles para retratar el sistema desde diferentes puntos de vista de manera que hay una gran cantidad de proyectos para los sistemas de adquisición de datos. Actualmente se está diseñando un sistema de adquisición de datos que, a partir de fotos del perfil de la ola, reproduzca la forma del perfil como función del tiempo.
- c) *Visualización de Fluidos*. Dentro de los cursos especializados de laboratorio se ofrecen también prácticas dirigidas a aprender diferentes técnicas ya muy desarrolladas para la visualización en Dinámica de Fluidos. Esta parte es desarrollada en su mayoría dentro del Taller de Hidrodinámica en donde se tiene la infraestructura necesaria para realizarlas y donde además se realizan propuestas para implementar estas técnicas en el caso de tener recursos limitados. En este sentido, durante la pandemia derivada del COVID-19, un becario asociado al Proyecto -DGPA-PAPIME PE111020 desarrolló un PIV casero.
- d) *Métodos numéricos* Muchos de los cursos se complementan con métodos numéricos que se pueden dividir en dos grandes grupos. Por un lado están los métodos que se requieren para la adquisición de datos y su análisis. Por el otro lado están las simulaciones numéricas, que son

soluciones numéricas a conjuntos de ecuaciones diferenciales parciales que representan algún fenómeno. Tanto en las clases de laboratorio como de métodos numéricos se ofrecen proyectos de los dos tipos. Dentro de los cursos se incluye el uso de diferentes programas como Mathematica, MatLab o Octave (la versión de Linux) de manera que los alumnos tengan las herramientas más actuales para diseño de sistemas de adquisición de datos.

3.3. Proyectos integrales de Investigación.

Esta última parte es una integración del ejercicio de hacer observaciones y experimentos preliminares para llegar a un diseño experimental, su desarrollo y obtención de datos con un objetivo preciso. El punto de partida es la pregunta que se quiere contestar, por ejemplo, el estudio de la radiación de calor llevó a M. Planck a la hipótesis del cuanto. A partir de aquí se han diseñado miles de experimentos (mentales y reales) para corroborar los resultados de la Mecánica Cuántica.

Este es un objetivo muy importante a seguir, validar los resultados obtenidos de desarrollar teorías en Física. Sin embargo, también resulta necesario hacer experimentos que permitan modelar sistemas muy complicados (en particular pensados desde el punto de vista de estas teorías) que no es posible resolver por su complejidad matemática, ya que resultan en sistemas de ecuaciones diferenciales parciales. Por ejemplo, en el caso del tanque de olas someras del Laboratorio de Fluidos, hay que primero encontrar en qué régimen del espacio de parámetros lo que se observa se puede reproducir con alguna teoría conocida (como las ecuaciones de aguas poco profundas) y a partir del estudio de sus limitaciones poder proponer correcciones a los modelos a partir de las observaciones experimentales.

En el estado actual de algunos experimentos en el Laboratorio ya es posible ofrecer para estudiantes en los últimos semestres realizar este tipos de proyectos de investigación experimental en dinámica de fluidos experimental y computacional, como propuesta de sus últimas clase de Laboratorio que permiten estas actividades y, en la medida de lo posible llevarlos a proyectos de tesis de Licenciatura y maestría en Física e Ingenierías afines.