

El Circo de la Física: Actividades lúdicas en la divulgación de la física

The Physics Circus: Physics outreach playful activities

Karen Yael Castrejón-Parga¹✉, Jesús Manuel Sáenz-Villela¹

¹Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

RESUMEN

Este trabajo describe de una manera cualitativa cómo se presentan los conceptos y demostraciones físicas en El Circo de la Física, uno de los ejemplos a nivel mundial de este tipo de actividad de divulgación científica. También se discuten la filosofía y la manera en la que se conducen las actividades, así como algunas de las problemáticas en la introducción de conceptos de la física. Este trabajo describe cómo se facilita la comprensión de los conceptos al presentar aproximaciones, en lugar de ser abordados de forma rigurosa dada la gran diversidad de edades y niveles educativos del público. Se dan algunos ejemplos de las demostraciones y algunas sugerencias para su implementación. También, se describen las experiencias adquiridas en base a las aportaciones usuales de los asistentes que han participado en alguna de las presentaciones llevadas a cabo a lo largo de más de veinte años en México. Finalmente, se discute el trabajo a futuro para evaluar actividades de divulgación de este tipo.

PALABRAS CLAVE: demostraciones; experimentos; divulgación.

ABSTRACT

This work describes in a qualitative way how physical concepts and demonstrations are presented in The Physics Circus, one of the worldwide examples of this type of scientific outreach activity. The philosophy and how the activities are conducted are also discussed, and some of the problems in the introduction of physics concepts. This work describes how the understanding of the concepts is facilitated by presenting approximations instead of being approached rigorously, given the great diversity of ages and educational levels of the public. Some examples of the proofs and some suggestions for their implementation are given. Also, the experiences acquired are described based on the usual contributions of the attendees who have participated in some of the presentations carried out for over more than twenty years in Mexico. Finally, future work to evaluate dissemination activities of this type is discussed.

KEYWORDS: demonstrations; experiments; outreach.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Karen Yael Castrejón Parga
INSTITUCIÓN: Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450 norte, col. Partido Romero, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México
CORREO ELECTRÓNICO: kcastrej@uacj.mx

Fecha de recepción: 7 de abril de 2022. **Fecha de aceptación:** 26 de agosto de 2022. **Fecha de publicación:** 31 de agosto de 2022.



I. INTRODUCCIÓN

Hay Circo de la Física en diversas partes del mundo: en la Universidad de California en Santa Bárbara ^[1], en la Universidad de Texas ^{[2], [3]} o en la Universidad de Minnesota ^[4], por mencionar algunos ejemplos. En este trabajo se aborda uno de estos eventos, que es una actividad de divulgación científica que se ha presentado en México a nivel nacional y que tiene ya más de 20 años de experiencia. El Circo de la Física se presentó por primera vez en 1999 dentro de un evento de promoción de programas educativos, en donde los estudiantes de escuelas preparatorias presenciaron experimentos llamativos que tenían tanto el fin de demostrar diversos conceptos de la física como de divertir al público.

Dentro de la inspiración original de lo que con los años se convertiría en una actividad de divulgación científica en México, se tiene que la primera actividad similar que tuvieron los autores del presente artículo fue en una presentación de experimentos en la Universidad de Texas en El Paso (UTEP). La forma de exposición no ha cambiado en esencia; se sigue manteniendo cierto suspenso al presentar experimentos que parecen desafiar las expectativas del público, cuyas edades van de preescolar hasta la tercera edad. Los experimentos originales presentados en UTEP también fueron inspirados a su vez en otras universidades y otros medios, como el libro de Jearl Walker ^[5], en donde se enfatiza la exploración de los conceptos de la física a través de situaciones de la vida común.

Como todo acto circense, El Circo de la Física fue evolucionando con los años. Aunque algunos de sus experimentos pueden llamarse clásicos porque son los más frecuentemente presentados, con el tiempo se han modificado unos y agregado otros, desde los sencillos hasta los más complicados. Inicialmente se daba una serie de demostraciones alrededor de los conceptos de presión y temperatura usando nitrógeno, lo que da un buen impacto al momento de la presentación, pero a la larga se volvió poco sostenible debido a la constante necesidad de la adquisición de consumibles. Sin embargo, lo que realmente ha dictado la evolución de los experimentos es la necesidad de acercar el conocimiento científico a un número creciente de participantes. Es así como las reacciones, participaciones y comentarios de los miembros del público permiten evaluar cualitativamente el impacto que tiene la actividad en favor de la divulgación científica entre niños y jóvenes, además del público en general de México.

A partir de 2012 se ha tenido un incremento importante en el número de presentaciones de El Circo de la Física a nivel nacional, a través de la participación en el programa Domingos en la Ciencia de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC), a la que las diversas sedes pueden solicitar exhibiciones. Se han vuelto cada vez más comunes las llamadas giras de presentaciones. Por ejemplo, se tuvo un taller de El Circo de la Física en la Biblioteca Central Estatal Wigberto Jiménez en abril de 2017 en León, Guanajuato; una gira por el estado de Tamaulipas dentro del marco del Tercer Día del Investigador organizado por la Universidad Autónoma de Tamaulipas en septiembre de 2017, en donde se dieron presentaciones desde la inauguración del evento en Ciudad Victoria hasta su clausura en Tampico, y más recientemente una gira de verano para la Subsecretaría de Desarrollo Social Zona Norte del Estado de Chihuahua en junio y julio de 2019, en Ciudad Juárez, en la cual se contó con la participación de más de 700 niños en los 15 centros comunitarios a cargo del Gobierno del Estado en esta frontera.

Luego de celebrar el XX aniversario en 2019, El Circo de la Física se ha convertido en una de las actividades emblemáticas de divulgación científica y para esto se ha tenido que adoptar un estilo de trabajo que ofrece una experiencia de aprendizaje que busca adaptarse siempre a los muy diversos factores: número y edad del grupo participante, nivel educativo, condiciones físicas del escenario, clima al momento de la presentación, posibles desperfectos y fallas del equipo y, desde luego, a la reacción del público ante los resultados del experimento. Es así como el público se convierte en el actor principal en esta actividad de ciencia-espectáculo.

II. METODOLOGÍA

En la Reunión Anual de Asociación Americana de Profesores de Física Capítulo México (AAPT-MX) en 2019, en Ciudad Juárez, Chihuahua, se presentó una introducción a la filosofía y metodología seguida en las actividades de El Circo de la Física. Como se ha mencionado, uno de los pilares fundamentales de esta actividad de divulgación es la participación de los asistentes para facilitar la comprensión de los conceptos, a la vez que se estimulan distintas capacidades. Así es como se han adoptado las capacidades para el aprendizaje o pensamiento imaginativo de Lincoln Center Education (LCE) ^[6], que se emplean en programas académicos de nivel preparatoria en las llamadas New Visions Charter Highschools

[7], en las cuales no solo se estimula el aprendizaje de las humanidades a través de la experiencia de los estudiantes con actividades artísticas y culturales a cargo de artistas profesionales, sino también es posible incorporar el desarrollo de las capacidades de pensamiento creativo de los estudiantes en los programas académicos que incluyen asignaturas de matemáticas y física [7].

Algunos autores, como Van der Veen [8], han explorado las artes como un posible facilitador para la comprensión y visualización de conceptos de la física, así como para mejorar la perspectiva *a priori* que los estudiantes tienen al respecto. Además, Colletti [9] establece que la educación en ciencia y en arte, ambas pueden apoyarse mutuamente al ofrecer un método de enseñanza a través de pinturas famosas. Así, las actividades de El Circo de la Física se desarrollan con el espíritu de ofrecer una charla-espectáculo en vez de una lección formal, lo cual no debe ser preocupante; en [10] se establece que en las situaciones de aprendizaje en las que el rigor y los tecnicismos no son aplicables, una aproximación a los conceptos de la física puede ser útil dada la estimulación de las habilidades y capacidades de pensamiento y de resolución de problemas mediante demostraciones amenas, sobre todo en aquellos estudiantes que están inclinados a diversas disciplinas no necesariamente conectadas con las de STEM (siglas en inglés de Science, Technology, Engineering, and Mathematics), y más aún si el público se compone de familias, como ocurre comúnmente en las presentaciones de El Circo de la Física. White [11] también ha explorado la complejidad del arte-ciencia de la enseñanza en la física.

De acuerdo con el Lincoln Center Education (LCE), las capacidades de pensamiento creativo son: “Observa a fondo, exprésate, plantea preguntas, identifica patrones, establece conexiones, muestra empatía, acepta la ambigüedad, encuentra sentido, actúa y reflexiona/evalúa” [12]. Nótese que algunas de las capacidades descritas son completamente compatibles con lo que se espera de una actividad de aprendizaje basada en demostraciones. Ciertamente, quien participa observa lo que ocurre antes y después de una demostración, plantea preguntas acerca de cierto experimento, identifica patrones entre experimentos y/o conceptos, puede llegar a establecer conexiones entre cómo un concepto o experimento conduce a otro y puede actuar en base a los conocimientos aprendidos al reproducir alguno de los experimentos demostrados. Precisamente por esto, en El Circo de la Física siempre se debe tener un programa de experimen-

tos llamados números o actos. Se debe buscar la manera de ir de lo sencillo a lo complejo. La manera específica del cómo se establece un programa de experimentos para la presentación se discute con mayor detalle en la siguiente sección. Lo anterior obedece a lo que ya se mencionó respecto a las condiciones del escenario; no es lo mismo hacer una presentación al aire libre con participantes de pie, que una en un auditorio con 300 o más personas cómodamente sentadas.

Ahora bien, las capacidades de aceptación de la ambigüedad y de sentir empatía están directamente conectadas con la experiencia que el espectador debe tener en cualquier presentación de El Circo de la Física. Con “mostrar empatía”, la metodología del LCE se refiere a fomentar un ambiente de participación y comunicación efectiva entre los asistentes y ponentes, usualmente profesores y alumnos del Programa de Ingeniería Física de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, en donde la diversidad de perspectivas, respuestas e ideas acerca de un concepto o experimento sean escuchadas con atención y respeto. Usualmente, no es de esperarse que todos entiendan exactamente lo mismo de igual manera y al mismo tiempo. Por esta razón, una parte fundamental de las actividades es que son desarrolladas en un ambiente donde se fomenta la participación del público, ya sea activa o verbal, que comúnmente aplaude al terminar un experimento, lo que de cierta manera brinda una medición cualitativa del grado de aceptación de las actividades. Como ya se mencionó, crear este ambiente de participación depende de muchos factores.

En la filosofía de LCE, la capacidad de aceptar la ambigüedad puede interpretarse como que las actividades deben dar a entender que puede haber explicaciones que no cumplan con el rigor al que se hizo referencia en un párrafo anterior. Esto es algo que comúnmente se puede manifestar en miembros del público que ya conocen los conceptos o las demostraciones, como educadores de física de nivel medio superior o superior. Debe quedar claro de una manera natural para el grupo de participantes que las explicaciones en muchas situaciones no serán completas o rigurosas, sobre todo en presentaciones para el público en general. En este trabajo se discuten algunos de los inconvenientes encontrados para presentar formalmente algún concepto.

La filosofía del LCE respecto al desarrollo y estimulación de las capacidades de pensamiento creativo establece que la capacidad de reflexión/actuación no solo se da

al final de una experiencia de aprendizaje, sino que debe aprovecharse como herramienta para adquirir habilidades y conocimientos nuevos. Es así como las capacidades de crear significados y emprender acciones impulsan al grupo participante a buscar interpretaciones del conocimiento en situaciones fuera de los experimentos de El Circo de la Física, pero en las cuales se puede poner a prueba las ideas presentes en las demostraciones. Resulta difícil establecer una jerarquía de las capacidades de pensamiento creativo de la filosofía del LCE ya todas pueden tener impacto en el grupo de participantes. Por lo anterior, El Circo de la Física puede presentarse de manera amena y divertida, al estilo de un *performance*.

Se pueden establecer actividades de aprendizaje basado en demostraciones y experimentos, las cuales tengan el objetivo de estimular un conjunto de las capacidades propuestas en la metodología de LCE, de acuerdo con las características del grupo participante y del escenario. Para el público de corta edad se han desarrollado actividades de expresión corporal o vocalización para representar y visualizar algunos conceptos como la propagación de ondas, el sonido y la electricidad, entre otros. Así pues, El Circo de la Física es una opción de divulgación científica donde las actividades grupales e individuales se conjugan con los conceptos de la física para ofrecer posibilidades de aprendizaje y de desarrollo de habilidades de pensamiento científico y creativo. En la siguiente sección se detallan algunos de los ejemplos de estas actividades en la presentación de El Circo de la Física, así como los resultados de su implementación. La [Figura 1](#) muestra el esquema de las capacidades de pensamiento imaginativo de la metodología de LCE.



Figura 1. Diagrama de las capacidades de pensamiento imaginativo del Lincoln Center Education. Adaptada de ^[13].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A lo largo de los años se han presentado experimentos relativamente complicados con nitrógeno líquido, se han diseñado un par de los llamados tubos de Rubens, se han presentado diversas versiones de las figuras de Lissajous, se tiene un dispositivo de levitación acústica, se han presentado varias versiones de la placa de Chladni y se han tenido varias camas de clavos. Como se mencionó, se pretende que los temas se presenten en un contexto en que los asistentes puedan relacionarlos con vivencias o experiencias familiares, como experimentar una pequeña descarga eléctrica cuando se toca algún objeto metálico. En este sentido, la presentación de El Circo de la Física en la Reunión Anual de la AAPT-MX de 2019 puede considerarse como una de las funciones clásicas en cuanto al programa de experimentos relativamente más sencillos, mostrados como ejemplos de las actividades relacionadas con las capacidades de pensamiento científico-imaginativo.

En la siguiente sección se describen algunos de los experimentos de El Circo de la Física, de acuerdo con la metodología LCE, para los temas de electricidad y magnetismo, luz y sonido, pero pueden diseñarse actividades similares para los demás temas. También se reseñan las experiencias a partir de la percepción y participación de los asistentes.

A. ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

Para empezar la función, comúnmente se inicia con una actividad interactiva en la que participa un grupo de chicos o grandes (la edad no importa y el efecto didáctico es el mismo) en el experimento llamado “circuito humano”. Se usa un tubo de acrílico cuyo interior tiene un circuito conectado a tres diodos emisores de luz (LED) de color rojo, azul y verde y una pequeña bocina. Estos dispositivos son llamados comercialmente *energy tubes* o tubos de energía. En los extremos del tubo se tienen dos bandas metálicas que sirven como conductores. La idea es mostrar que las personas son capaces de conducir una corriente eléctrica para accionar el tubo.

Antes de iniciar la actividad se le pregunta al público si alguna vez han tenido alguna experiencia con una pequeña descarga eléctrica; comúnmente se tienen participaciones alrededor de los términos “descarga”, “electrostática”, “toques” y similares. Las respuestas pueden parecer variadas, pero se sitúan en el mismo contexto,

en que dentro del grupo participante se pueda tener una idea o experiencia con el concepto físico de electricidad.

Ya en la participación, se invita a algunos a ser parte activa del experimento una vez que se han discutido algunas ideas. Se les pide que se tomen de las manos o, incluso, a manera de juego pueden tocarse la oreja o la punta de la nariz o la mejilla. En este momento ocurre una de las asociaciones que se tienen con el concepto de electricidad; justo antes de tomar los extremos del tubo de acrílico, algunos participantes simplemente se sueltan de las manos o se niegan a tomar los extremos de este teniendo una descarga eléctrica. Es en este punto en donde se enfatiza que el espíritu de El Circo de la Física debe ser uno de aprendizaje en un ambiente seguro, por lo que siempre se opta por mostrar experimentos y demostraciones que sean relativamente seguros.



Figura 2. Demostración sobre circuito humano y tubo de energía. Los estudiantes activan el tubo de energía al completar un circuito humano. Imagen propia.

Una vez que se les convence de no romper el circuito y tomar los extremos del tubo de acrílico, la reacción de los asistentes es de sorpresa al presenciar cómo al momento de hacer la conexión o cerrar el circuito, el tubo se acciona emitiendo luz y sonido. De aquí se tiene que en muchas ocasiones los participantes toman la iniciativa al soltarse de las manos y volver a tomarse de ellas para comprobar si efectivamente son responsables de cerrar o abrir el circuito. La parte divertida es cuando se les invita a que, en vez de las manos, ahora se toquen la punta de la nariz.

En este momento se pueden introducir los conceptos de materiales aislantes y conductores. Incluso se puede

hacer experimentos literalmente con lo que se tenga en el auditorio. También es común pedirles que se tomen de la ropa o del cabello para investigar cómo los distintos materiales interrumpen la corriente. Esta actividad puede durar unos 10 minutos y naturalmente depende de las características del público cuánto se profundiza en los conceptos. Si se ayuda a estudiantes de nivel básico a asociar la actividad física con la deshidratación y los electrolitos, quizá resulte más fácil explicarles el porqué el cuerpo humano puede conducir la corriente.

Una vez que se ha iniciado con la actividad, se puede presentar las maneras en las que se genera la carga eléctrica de una forma que les resulte familiar, asociándolas con la experiencia de quitarse un suéter de lana. Luego de escuchar las participaciones del público, se puede hacer la demostración de la lata de aluminio con la piel de conejo antes de usar un generador electrostático de Van de Graaf. En este punto, la participación es un poco más usual en el sentido de que se invita a un miembro del público para que se le ericen los cabellos y no debe sorprender que la reacción es de asombro. Dependiendo de las condiciones del lugar, se puede seguir explorando las ideas iniciales sobre materiales conductores, aislantes y corriente eléctrica. En este sentido, se le pide a un participante que se tome de la esfera de Van de Graaff, pero estando de pie o sentado en un banco de madera. Normalmente la carga debe irse a tierra cuando no se usa el banco, por lo que se les recuerda el experimento con el tubo de acrílico. Esta es la manera como pueden irse estableciendo conexiones entre los conceptos, de acuerdo con la metodología LCE.



Figura 3. Demostración con el generador electrostático de Van de Graaf. Imagen propia.

En esta demostración es común dar algunas instrucciones de seguridad antes de iniciar y se debe ser siempre claro de que existe la posibilidad de experimentar una descarga eléctrica inofensiva, claro está, pero se opta por recomendar que los más pequeños no participen. También es común hacer la demostración del generador de Van de Graaff con unas tiras de papel de China pegadas a la esfera para dar una primera aproximación al efecto. Al ver que las tiras de papel se levantan alejándose por la repulsión eléctrica, el grupo participante puede hacer una conexión de lo que pasará si una persona se toma de la esfera de Van de Graaf. Debe mencionarse que, de acuerdo con la experiencia adquirida en las presentaciones, nunca se debe asumir que el público ya conoce algún concepto o que ya ha visto alguna de las demostraciones.

También, como parte de los experimentos de electrostática, es muy común cerrar esta parte con el experimento llamado “espada de la ciencia”, que es un generador de Van de Graaf portátil capaz de generar carga eléctrica de una manera equivalente a frotar una vara de plástico con pelo de conejo. La diferencia radica en que la carga generada es la suficiente para hacer levitar objetos pequeños, como confeti, o trocitos de papel o poliestireno. Normalmente se usan unos aros de papel plástico que toman formas llamativas mientras levitan en el aire una vez que son cargados eléctricamente con la misma vara.

Usualmente se puede hacer referencia al diagrama de cuerpo libre asociado al objeto; la fuerza de gravedad actúa hacia abajo mientras que la repulsión eléctrica entre el objeto y la vara puede actuar hacia arriba. En general, la dirección de repulsión actúa en determinado sentido según se coloque la vara alrededor del objeto. Esta es una demostración que ha funcionado excelentemente. El efecto de ver levitar eléctricamente un objeto ha sido siempre muy llamativo; es una de las demostraciones que más le gusta al público. Es también muy común explicar el mismo experimento usando un globo inflado que ha sido frotado con lana. El efecto es el mismo y los materiales son muy fáciles de conseguir.

Uno de los experimentos que frecuentemente siguen a estas actividades es la bobina de Tesla, cuyos detalles de diseño y operación típicamente rebasan a los objetivos de las actividades en general. Sin embargo, es una buena demostración para dar una introducción al campo electromagnético, término que en ocasiones se limita a “energía eléctrica”, dependiendo de las edades de los

asistentes. Se pueden tener participaciones iniciales respecto a si el público conoce el concepto del campo magnético que rodea nuestro planeta, protegiéndolo de la radiación solar, o si han escuchado acerca de las auroras boreales, por mencionar algunas ideas. En este tema, una de las actividades de estimulación de las capacidades es volver a usar el tubo de acrílico y acercarlo lentamente a la bobina. A cierta distancia, el tubo emitirá luz y sonido, pero en esta ocasión no hay circuito cerrado; nadie ni nada está cerrando el circuito con los extremos de las bandas metálicas del tubo de acrílico como se tiene en el caso anterior, por lo que se estimula la capacidad de pensamiento científico-imaginativo respecto a la tolerancia de la ambigüedad, dado que la explicación del circuito cerrado no se aplica en este caso.

Así pues, los conceptos de campo electromagnético y diferencia de potencial pueden ser explorados ante una nueva situación presentada con el uso de la bobina de Tesla. En este caso, si se acerca el tubo a la bobina a cierta distancia, solo el LED rojo se enciende. Si se acerca un poco más, se activa el verde y acercándolo un poco más, finalmente se activa el azul, por lo que puede presentarse la idea de alcance radial respecto al eje de la bobina. Nótese que con esta idea se puede establecer una relación, si bien indirecta, entre la intensidad de campo electromagnético requerida por el LED particular para encenderse y la distancia con respecto al eje de la bobina. Claramente, una explicación detallada de la operación y diseño de la bobina de Tesla requiere de mucho más tiempo y es completamente dependiente de los conceptos que el público tenga. Usualmente se reservan este tipo de explicaciones para demostraciones dentro de una clase de nivel superior, aunque pueden adaptarse bien para el nivel medio superior.

Las demostraciones de electricidad y magnetismo han resultado ser una buena manera de iniciar las funciones de *El Circo de la Física*, ya que ofrecen oportunidades para estimular las capacidades de pensamiento imaginativo de manera divertida y educativa y en un lenguaje accesible que puede adaptarse de acuerdo con las edades y características del público.

B. LUZ

Una vez que se exploran los conceptos relacionados con la bobina de Tesla, se puede pasar a las ideas relacionadas con la luz. Se usan tubos espectrales que contienen diferentes gases a bajas presiones, como mercurio,

vapor de agua, neón, argón y helio. Al acercarlos a la bobina, como resultado se obtiene que los tubos emiten luz de ciertos colores específicos.

Generalmente se inicia la demostración con uno de los tubos que emite una luz tenue, como en el caso del aire, donde el efecto puede ser no muy espectacular a primera vista y en donde se emite luz de color morado pálido. Sin embargo, se pueden estimular las capacidades mencionadas al hacer preguntas abiertas al público, como “¿De qué color debe verse el tubo de vapor de agua?”, a lo cual muy frecuentemente responden de manera intuitiva que debe ser de color “azul”. Es en este momento que, con cierto espíritu circense, se hace la demostración para señalar que el vapor de agua emite una luz muy similar a la del tubo de aire. Entonces se pueden hacer la pregunta sobre cuáles son las similitudes entre estas dos sustancias. Posteriormente, el grupo de participantes hace suposiciones acerca del color de la luz de los demás tubos al estar en presencia del campo electromagnético producido por la bobina de Tesla. Usualmente se deja hasta el último el tubo de neón que emite luz roja brillante que siempre causa sorpresa.

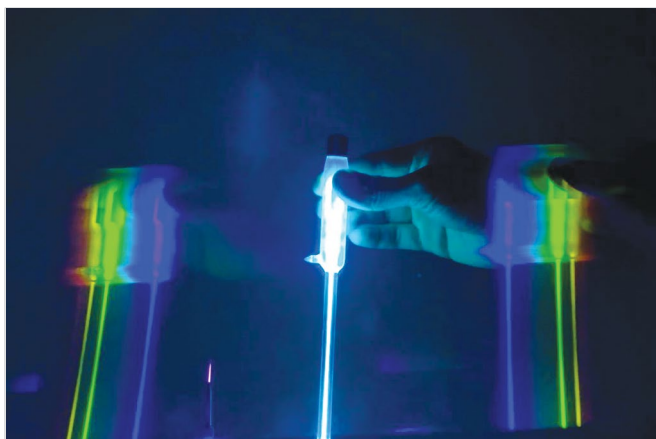


Figura 4. Demostración con la bobina de Tesla y los tubos espectrales. Fotografía tomada a través de una película de difracción. Imagen propia.

Nótese que las ideas asociadas con la demostración de los tubos espectrales y la bobina de Tesla ya abarca temas relacionados con el espectro de luz emitida por los átomos del gas confinado en los tubos. Para el público en general, este concepto puede ser presentado mediante el concepto de la luz solar y el arcoíris. Se tiene ya la idea entre los asistentes de que la luz es la composición de varios colores, lo que, quizá, si las condiciones lo permiten ayude a introducir los conceptos de “frecuencia” o “longitud de onda”.

Para explorar el concepto del espectro de la luz visible, se puede hacer el experimento clásico de pasar la luz de una lámpara de mercurio a través de un prisma. O bien, se pueden usar los lentes de rejilla de difracción, que normalmente se reparten entre todos los asistentes para que vean las líneas espectrales de cada tubo, las cuales se combinan para producir el color apreciado a simple vista.

Cuando ya se han presentado algunas ideas acerca de la luz, se procede a hacer demostraciones con láseres. Típicamente se usan tres: azul, verde y rojo, los cuales, de acuerdo con el fabricante, tienen una longitud de onda de 405, 523 y 605 nm aproximadamente, y con una potencia de 5 mW, la que los hace razonablemente seguros.

Luego de algunas recomendaciones de seguridad, se procede a cuestionar los participantes sobre algunas de las características de los haces. Se les pregunta cuál es el más intenso, a lo que típicamente responden que es el de color verde. De la misma manera, identifican que los láseres rojo y azul son menos intensos que el verde. Esto se hace antes de la introducción del concepto de energía de la luz.

Una variante frecuentemente con los láseres es utilizar un gas en aerosol usado para efectos especiales de neblina. Aunque estas sustancias no son tóxicas, son inflamables, por lo que tienen que usarse tomando las debidas precauciones. El efecto de neblina es especialmente efectivo en una sala a media luz; los láseres interactúan con las partículas del gas, por lo que se dispersan mostrando claramente la trayectoria recta del láser, especialmente del verde, al que previamente ya el público ha identificado como el más intenso. Es una demostración sumamente sencilla que siempre cautiva el interés del público.

Como es de suponerse, suelen usarse las demostraciones más llamativas luego de las otras que no lo son tanto. La manera de presentar las ideas de la trayectoria que sigue la luz típicamente comienza con hacer una pregunta de hasta dónde llegaría el haz de luz. Algunas respuestas son: “En el techo del lugar” o “En las nubes”. Esto indica que ya se tiene una idea previa de que la luz es dispersada por los objetos, a lo cual los presentadores indican que la luz choca con los objetos. En este sentido, se usa también un guía de luz que consiste en un pedazo de acrílico transparente de forma curva, por el

cual, mediante reflexión total interna, la luz cambia de dirección al incidir sobre la superficie interna de la guía. Esta es una excelente demostración útil para presentar los dispositivos de fibra óptica. Como alternativa, la demostración puede llevarse a cabo usando un cable de audio de fibra óptica.

Cuando ya se han discutido los temas e ideas de la luz, se procede a hacer una demostración sobre la combinación de colores. Se usa un dispositivo que tiene LED rojo, verde y azul y cuya luz puede ser proyectada sobre una pantalla. Se procede a hacer combinaciones de colores, con rojo y azul, cuya combinación produce el magenta. Esta demostración sirve para presentar el concepto de colores primarios.

En las funciones de El Circo de la Física se definen como colores primarios al rojo, verde y azul (RGB), los cuales son los primarios aditivos. Es de especial interés darse cuenta de que algunas de las participaciones de los asistentes coinciden en que en alguna clase de educación artística se les dio la definición de cian, magenta y amarillo (CMY) como colores primarios. Se enfatiza en las presentaciones que ambas definiciones son válidas, pero se aclara que se puede hacer referencia a los colores primarios aditivos para RGB y a los primarios sustractivos para CMY, lo cual reduce la ambigüedad de la definición y sirve como evidencia adicional de que las experiencias con el arte pueden ser encaminadas para presentar conceptos de la física. Como es de esperarse, al final de la demostración se activan los tres LED para producir luz blanca. Originalmente, esta demostración se hacía usando un disco de Newton.

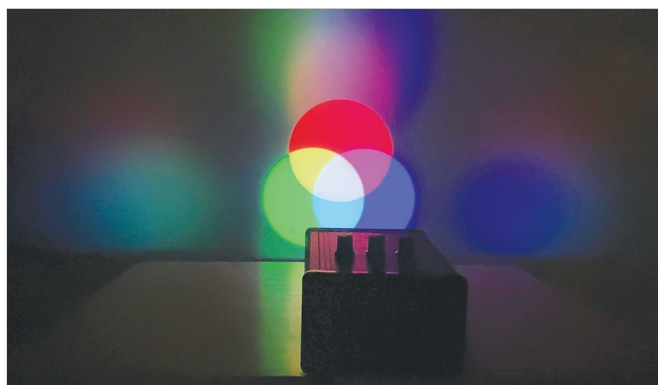


Figura 5. Demostración sobre colores primarios. Imagen propia.

Luego de presentar las ideas sobre los colores, se procede a hacer demostraciones de fluorescencia y de fosforescencia. En el caso de la primera, se usa como de-

mostración inicial una botella con agua tónica o agua quina, que es una bebida carbonatada a la que se le agrega quinina, dándole un sabor amargo. La quinina es fluorescente y emite luz de longitud de onda de unos 450 nm, como se describe en [14]. La fluorescencia de la quinina se debe a la incidencia de la luz del láser azul, y no responde a la luz de los láseres rojo y azul, por lo que precisamente se usan al inicio de la demostración. Si se usa una lámpara de luz negra se consigue que toda la botella de agua quina emita luz, produciendo un efecto sumamente llamativo. Si los conocimientos de los asistentes lo permiten, se exploran los conceptos de longitud de onda y energía de la luz, siendo la energía más baja para el color rojo que para el verde y el azul, respectivamente, por lo que puede hacerse la distinción entre intensidad de la luz y energía de la luz.

Recientemente se han incorporado a la demostración más líquidos fluorescentes; se tiene un set de tinturas fluorescentes que emiten luz en varias longitudes de onda. El concepto de fluorescencia es quizá uno de los que tienen una mayor difusión previa entre el público, ya que se tiene conocimiento de los llamados marcadores fluorescentes o algunos otros objetos similares.

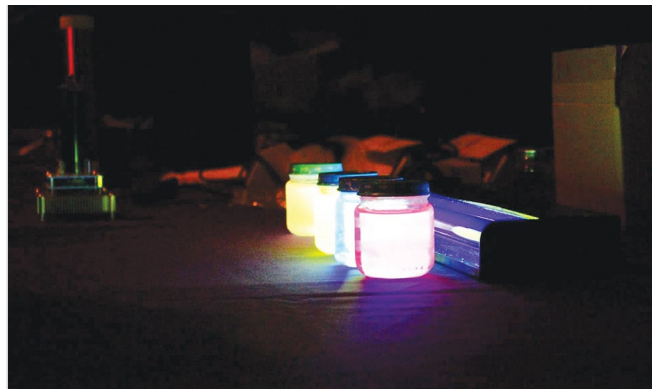


Figura 6. Demostración sobre fluorescencia con diversas sustancias con pigmentos fluorescentes usando una lámpara de luz violeta. Imagen propia.

Una vez que se establece el concepto de sustancias fluorescentes, se puede hacer la demostración de fosforescencia. En el mercado se puede conseguir hojas de papel de fósforo, el cual responde emitiendo luz verde ante la estimulación con luz azul. Es usual referirse a los experimentos con algún título llamativo. Se tiene un ejemplo en la demostración de fosforescencia, la cual suele ser llamada “pintando con luz”. La dinámica consiste en hacer incidir la luz de los láseres rojo, verde y finalmente azul sobre el papel de fósforo. Lo que resulta siempre

sorprendente para los asistentes es que en la fosforescencia la emisión es prolongada en comparación con la fluorescencia del agua tónica. En este caso, las figuras trazadas por el haz de luz azul siguen brillando en luz verde por algunos segundos, por lo que efectivamente alguien puede hacer un dibujo o escribir su nombre con luz. Se usa este tiempo de emisión para distinguir cualitativamente a la fluorescencia de la fosforescencia. En [14] se explica que la fluorescencia tiene un tiempo de duración del orden de 10 ns mientras que la fosforescencia tiene una duración típica que va de los milisegundos a los segundos. Explorar con más detalle los conceptos de la física relacionados con las propiedades de la materia respecto a la fluorescencia o fosforescencia, quizás sea más apropiado en alguna demostración dentro de una asignatura de preparatoria o licenciatura.

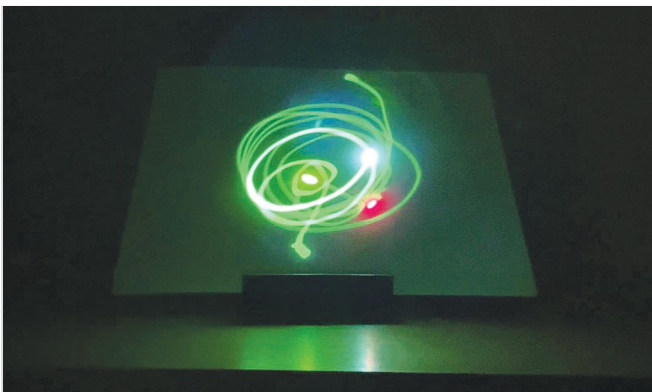


Figura 7. Demostración de fosforescencia con láseres, rojo, verde y violeta sobre papel de fósforo en la sesión “pintando con luz”. Imagen propia.

Las demostraciones con luz suelen ser de las más llamativas. Para asegurar una mejor presentación, se suele pedir a las sedes, en medida de lo posible, que se asigne un espacio donde las luces de la sala puedan ser prendidas y apagadas. Similarmente, se les pide que se cubran las ventanas aunque sea con papel periódico. Esta sencilla preparación previa hace mucho más efectivas las sesiones. Naturalmente, si el lugar de la función ha de desarrollarse al aire libre, durante el día no se programa ningunos de los experimentos de luz. Este tipo de condiciones no siempre son conocidas por los presentadores de antemano, por lo que se tienen que diseñar programas de experimentos alternos.

C. SONIDO

Una vez que se han discutido los temas de electricidad y magnetismo y de luz, en los cuales la participación de

los asistentes es pieza fundamental de una función de El Circo de la Física, se procede a explorar las ideas que el público tiene acerca del sonido. Se describen a continuación algunas de las demostraciones.

Es común referirse al sonido como una onda, concepto que puede ser difícil de comprender para los más pequeños. Es por esto que se desarrolla la idea a partir de la participación de los asistentes; se les pide: “Formen una ola”, lo cual es familiar para todos y funciona especialmente bien en auditorios donde el número de asistentes no solamente requiere de la participación para mantener el interés, sino que sirve además como una primera aproximación al concepto de onda transversal, la cual puede usarse para distinguirla de una onda longitudinal. Es común hacer ejercicios de vocalización para dar algunas ideas acerca de tono, volumen y timbre del sonido. Esta dinámica grupal funciona bien porque se adopta el lenguaje de la música y, en este sentido, por un momento los participantes son integrantes de “la orquesta del circo” y hay un “director o directora de la orquesta”. Nótese que estos roles no solo son divertidos, sino que también tienen el propósito de reforzar el control del grupo, dado que se procede literalmente a hacer ruidos y sonidos de diferentes maneras.

Una vez que los asistentes se han familiarizado con algunas definiciones elementales sobre el sonido, o quizá un tanto más avanzadas si las características del grupo lo permiten, se hace la demostración del llamado *whirly tube*, que es un tubo de plástico corrugado flexible que se agita dándole vueltas en el aire para producir sonido. La teoría del principio físico es descrita por Crawford [15] y más recientemente por Ruiz y Berls [16]. Sin embargo, en las actividades primero se pregunta si conocen el tubo. De manera intuitiva, las participaciones van frecuentemente en el sentido de que el dispositivo “suena” de alguna manera, sin embargo, no se dan instrucciones de su funcionamiento, por sencillas que sean. Lo que se refuerza con esta actividad es que el público contribuya con ideas. Algunas respuestas comunes a la pregunta sobre cómo se produce el sonido son: “Se sopla”, “Se golpea”, “Se raspa”. Todas estas ideas son correctas, pero no son la mejor respuesta. Sin embargo, en el espíritu de la actividad, nunca se les corrige sino que se les guía en la dirección correcta, ya que de ninguna manera se debe desalentar la participación del público. Finalmente, el grupo ve que al darle vueltas rápidamente el tubo emite sonido.



Figura 8. Los tubos corrugados en movimiento. Imagen propia.

El experimento descrito del tubo corrugado es uno de los claros ejemplos del cómo intentar dar una explicación completa puede llegar a ser contraproducente, más aun si el objetivo de la actividad es el de dar una aproximación al concepto físico. En principio, se podrían tratar los conceptos de frecuencia fundamental y sobretonos producidos por el tubo corrugado en función de la rapidez rotacional del tubo. Serafin y Kojs proponen un modelo físico que simula el efecto [17]. Sin embargo, una explicación detallada sería apta en una clase donde se aborden los temas mencionados sobre sonido y la acústica de los tubos corrugados. En este caso, podría usarse un espectrograma como el mostrado en la Figura 9, que se genera con una grabación simple de una de las notas producidas por la rotación del tubo corrugado. El espectrograma es similar a los sonogramas mostrados en [17].

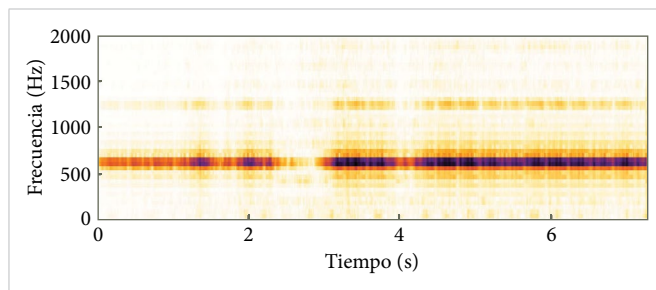


Figura 9. Espectrograma del tubo corrugado usado en la demostración de sonido en donde se muestra una nota base con una frecuencia arriba de los 650 Hz y un sobretono a los 1250 Hz, aproximadamente. Imagen propia.

La manera en que comúnmente se describen los sonidos producidos por la rotación del tubo corrugado se limitan a “grave” o “agudo”, es decir, quizá sin mencionar el concepto de frecuencia si el grupo de participantes no

está familiarizado con este. Adviértase que, de acuerdo con las notas producidas y a los conocimientos previos de público, se podrían usar los conceptos de nota fundamental, octavas, cuartas y demás intervalos musicales, como el que se muestra en el espectrograma de la Figura 9. En la presentación se decide reducir la carga cognitiva, dado que la explicación completa del sonido producido por el tubo corrugado es más complicada, como se muestra en la Figura 10, donde se expone el periodograma que resulta del archivo de audio grabado. Es la gráfica en decibeles de la transformada discreta de Fourier de la señal de audio.

Las Figuras 9 y 10 muestran que el contenido armónico del sonido producido por la agitación a cierta rapidez del tubo corrugado es un tanto complicado. Sin embargo, la Figura 10 muestra también una frecuencia que sobresale de las demás (a unos 650 Hz), por lo que efectivamente se puede simplificar la explicación al decir que se emite una nota en vez de que se tiene la nota con contenido armónico que le da el timbre al sonido del tubo corrugado.

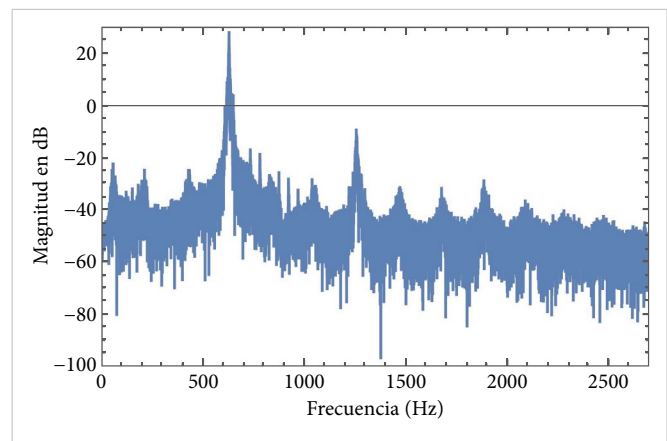


Figura 10. Periodograma del tubo corrugado usado en la demostración de sonido. Imagen propia.

Como se discutió en el experimento del tubo corrugado, las notas musicales pueden ser una estrategia didáctica para presentar otros conceptos, tales como el sonido producido por los tubos de resonancia llamados comercialmente *boomwhackers*, los cuales son un set de tubos de plástico flexibles de ciertas longitudes, pero del mismo diámetro, de tal forma que se tenga una escala musical completa, como la de do mayor usada en las demostraciones de El Circo de la Física. Ruiz [18] trata algunos conceptos sobre la matemática de las escalas musicales producidas por los *boomwhackers*.



Figura 11. Los tubos de resonancia en acción. Imagen propia.

De la misma manera que en el caso del tubo corrugado, la demostración comienza presentándole los tubos de resonancia al público y al cuestionarles sobre el mecanismo para producir sonido las respuestas usuales son que se gira de la misma manera en que se hace con el tubo corrugado. Se invita al grupo a intentarlo y descubren que no funciona. En ese momento es común que lo golpeen contra algún objeto, por lo que producen una nota de acuerdo con la longitud del tubo.

La dinámica de los *boomwhackers* consiste en tener ocho participantes para cada nota de la escala de do mayor. La actividad consiste en golpear el tubo contra la mano para producir la escala musical.

Es común explorar los conceptos de intervalos, escalas o acordes producidos al golpear los tubos que corresponden a las notas de do, mi y sol para producir el acorde de do mayor. Con algo de práctica, los *boomwhackers* son usados para tocar alguna pieza sencilla, en el tono de do mayor o en cualquier otro si se tienen tubos con diversas afinaciones. Uno de los proyectos pendientes de El Circo de la Física es montar una presentación en la que se use un mayor número de tubos con el objetivo de poder tocar una pieza de dificultad moderada.

Otra de las demostraciones comunes sobre sonido es la famosa placa de Chladni. A lo largo de los años se han usados diversas versiones, comenzando con una simple placa cuadrada metálica perforada en el centro para sujetarla firmemente a un soporte. Se frota con un arco de cello alguna de las orillas y se producen notas debido a la resonancia de la placa. Para visualizar el efecto, se

espolvorea sal o algo similar sobre la placa para que se acumule en los nodos. Es un experimento que siempre llama la atención, pero que requiere algo de práctica.

Los patrones de Chladni de la membrana vibrante o de la placa del experimento se obtienen de la solución de la ecuación de onda para una región. Claro está, los detalles de la solución de la ecuación diferencial escapan a los objetivos de El Circo de la Física y son quizá aptos solamente para estudiantes de nivel licenciatura. La demostración de Chladni pudiera ser incluso más complicada si se usara una placa de forma irregular; en [19] se muestra un método numérico para obtener las soluciones de la ecuación diferencial y para visualizar los modos de vibración de placas de forma irregular.

Otra versión más sencilla de demostrar, pero que requiere de aparatos más sofisticados que un arco de cello, consiste en emplear un generador de ondas y un oscilador mecánico. Se requiere simplemente encontrar las frecuencias de resonancia para el arreglo particular de la placa. Se pueden usar ambas versiones del experimento de la placa de Chladni, pero, al igual que en cualquiera de los experimentos y demostraciones, se invita al público a que intente reproducirlos en casa, en concordancia con la estimulación de las capacidades del pensamiento científico-imaginativo.

Un uso alternativo a la demostración de la placa de Chladni es utilizar un oscilador mecánico con una cuerda elástica. Junto con el uso de un estroboscopio, por lo que se requiere un lugar con poca luz, se puede mostrar al público los conceptos de ondas estacionarias en una cuerda.

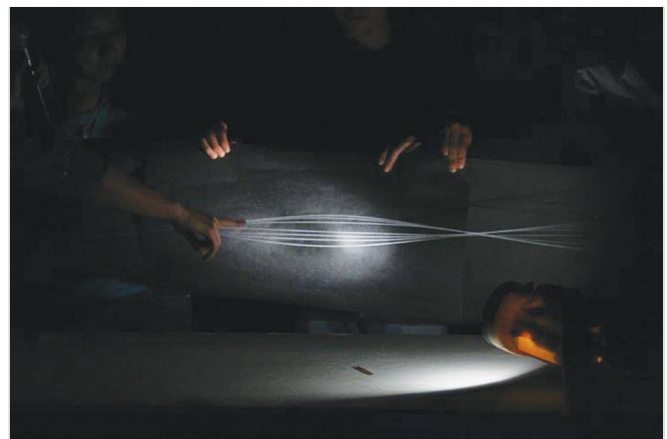


Figura 12. Demostración de ondas estacionarias con el uso de una lámpara estroboscópica. Imagen propia.

Se suele terminar la sección de experimentos de sonido con el relacionado a la producción de las llamadas figuras de Lissajous, las cuales son ampliamente conocidas; en ^[20] se discute un diseño de un aparato que permite producir estas curvas usando cañas de instrumentos musicales en vez de diapasones o arco de violín.

Originalmente, en El Circo de la Física el experimento de las curvas de Lissajous se montaba con dos bocinas colocadas de manera vertical sobre algunos soportes. Cerca de estas y frente a ellas se sujetan dos espejos de tal forma que uno pueda vibrar verticalmente y el otro horizontalmente y un generador de ondas conectado a un amplificador hacía vibrar los espejos. Se colocaba un láser de tal forma que el haz incidía sobre ambos espejos y hacía una pantalla, formando imágenes de acuerdo con la frecuencia producida en un generador de señales.

Una versión actual mucho más sencilla de montar consiste en poner una bocina inalámbrica dentro de un plato hondo y sobre este se coloca un globo a manera de membrana vibrante. El sonido producido por un generador de señales en una aplicación de dispositivo móvil puede hacer vibrar la membrana. Aprovechando esto, se pega un pedazo de espejo sobre el cual incide un láser que se refleja hacia una pantalla. El efecto es muy llamativo, sobre todo si se usa un láser verde. Las características del sonido son comúnmente exploradas con música reproducida en el dispositivo móvil.

Frecuentemente se usa música de cello, cuyas frecuencias son adecuadas para producir una resonancia significativa en el espejo, de acuerdo con la frecuencia y volumen de las notas musicales. Suele hacerse la demostración con el Preludio no. 1 en Sol Mayor de Bach por dos motivos: la pieza resulta familiar (y no es muy larga) y se aprovecha una vez más la asociación positiva que se tiene con respecto a la pieza musical para presentar los conceptos de resonancia, reflexión de la luz y figuras que son producidas por la vibración de la membrana. La pieza resulta también efectiva en la demostración dada la sonoridad del cello, que logra producir patrones llamativos en el experimento. Es un ejemplo donde el arte directamente está asociado a la física. Claro está, se usan diversos géneros musicales para hacer la demostración. La respuesta del público quizá no puede ser mejor; usualmente aplauden al terminar la pieza.

La versión del experimento con música es un ejemplo del cómo la tecnología ha facilitado el montaje y la pre-

sentación de algunas de las demostraciones de El Circo de la Física. Mientras que hace dos décadas se necesitaba un amplificador de sonido y bocinas, además de un generador de frecuencias, ahora se usa la tecnología *bluetooth* y las aplicaciones de generadores de onda o de simuladores de instrumentos musicales de los teléfonos inteligentes para facilitar el montaje del experimento, a la vez que se simplifican los requerimientos materiales para que el público pueda intentar reproducir las demostraciones.

La analogía directa con las notas musicales producidas en el tubo corrugado y en los tubos de resonancia y el uso de música clásica, o de cualquier otro género, está de acuerdo con el concepto general de las actividades de El Circo de la Física: aprovechar las asociaciones positivas que el público pueda tener acerca del arte y de la música como medios introductorios en la presentación de conceptos de la física.

D. PRESIÓN

Ciertamente no todos los experimentos que se pueden desarrollar como parte de las actividades de El Circo de la Física pueden asociarse directamente a actividades de índole artístico. Sin embargo, no dejan de ser experimentos y demostraciones llamativos. Uno de estos casos es cuando se aborda el tema de presión atmosférica.

Originalmente, los experimentos sobre este tema se hacían siempre usando una campana y una bomba de vacío, lo cual continúa haciéndose, pero actualmente se cuenta con un medio mucho más sencillo de adquirir: se trata de un vaso (acrílico o de vidrio) con tapadera al cual se le puede extraer aire con una bomba manual. Es un recipiente que se usa para conservas y a pesar de ser comparativamente más pequeño que la campana de vacío, se puede colocar un globo un poco inflado dentro de él para luego extraer el aire. Si la edad promedio del público lo permite, entonces se puede hacer la actividad a manera de truco de magia y la dinámica podría consistir en preguntarle a los asistentes qué es lo que se debe hacer para inflar un globo y cómo puede inflarse al que ya se le ha hecho un nudo. Los resultados de la demostración, aunque se trate de una sencilla aplicación del concepto de presión atmosférica, no deja de ser sorprendente. De la misma manera se pueden colocar unos cuantos bombones para expandir su volumen dada la presión menor en el interior del vaso.

Una vez que se presentan las ideas básicas de la presión atmosférica, se puede abordar el tema de la presión de una manera más general. Se puede iniciar con una tabla con un solo clavo y un globo inflado. Al preguntar qué pasa si se pincha el globo con el clavo, la respuesta invariablemente siempre es la misma: el globo debe reventarse. Luego de esto, se usa una tabla de las mismas dimensiones, pero ahora con muchos clavos colocados de manera ordenada a manera de mini cama de clavos. Se hace la misma pregunta al público y muy comúnmente se tienen la respuesta de que nuevamente se va a reventar. Para sorpresa del público, el globo puede presionarse fuertemente sobre los clavos y no se revienta, como es sabido. Igualmente, es una demostración sencilla que permite hablar de fuerza distribuida en un área determinada.



Figura 13. Demostración con la cama de clavos pequeña y globos. Imagen propia.

A lo largo de los años, la cama de clavos se ha usado para cerrar la función de El Circo. Al introducir la demostración, se menciona los llamados faquires y acto seguido se presenta al público una cama de clavos fabricada por los presentadores. Se hace la analogía con lo que pasó con la mini cama de clavos y el globo y esto ayuda a entender por qué una persona que se recuesta sobre la cama de clavos no debe sufrir daño alguno. Esta es una demostración que se hace con ciertas reservas; si se tiene la posibilidad de que algunos asistentes se puedan lastimar, aunque sea leve, no se permite que se recuesten sobre la cama de clavos. Debido a las precauciones tomadas a lo largo de los años, la demostración se ha hecho de manera segura con participantes de todas las edades.

Cuando las presentaciones son a nivel local, la cama de clavos es transportada sin problemas. Sin embargo, para cuando se tiene una función programada en algún otro estado, dependiendo del lugar, se ha pedido que la sede fabrique una cama de clavos según algunas especificaciones sencillas, lo cual es relativamente fácil y de bajo costo. Esto se hizo en la gira de El Circo de la Física en el estado de Tamaulipas en 2017.

Cuando se han presentado algunas demostraciones con globos que se pueden reventar con la cama de clavos, son válidas algunas aclaraciones respecto al desarrollo de todos los experimentos. Es de suma importancia conocer algunos detalles previos de quiénes serán los asistentes y de cuáles son las condiciones del lugar de la presentación. Esto se debe a que quizá el sonido de un globo que se reviente asuste a algún miembro del grupo de participantes. Incluso, la misma anticipación de si se va a reventar o no puede causar ansiedad. De la misma manera, tal vez las luces o los láseres puedan generar cierta inquietud. Se procura iniciar la función con la mejor información sobre el público que la sede pueda proporcionar antes de las presentaciones.

Para el desarrollo óptimo de las actividades, es de suma relevancia saber si hay miembros del público con alguna capacidad diferente física, sensorial o intelectual para saber qué lenguaje usar y cómo hacer que todos los asistentes tengan la misma gran experiencia de vivir la física a través de las demostraciones y experimentos, como los que se han llevado a cabo por más de dos décadas en las actividades de El Circo de la Física. En este sentido, la American Association of Physics Teachers (AAPT) ha hecho un estudio de inclusión en STEM, considerando factores como sexo, raza y origen étnico, y se hacen varias recomendaciones dirigidas a la AAPT con el objetivo de identificar estrategias dirigidas a mejorar la inclusión y diversidad en STEM en todos los campos, desde el salón de clase hasta el ambiente profesional y laboral ^[21].

IV. CONCLUSIONES

Como se detalla en este trabajo, El Circo de la Física propone no solamente una serie de experimentos y demostraciones, sino además una manera de hacer que el público los disfrute y aprenda. La analogía con la educación del arte es bastante adecuada, ya que permite al grupo participante el tener asociaciones positivas del arte hacia los conceptos de la física. Uno de los objetivos

fundamentales de las actividades es acercar el conocimiento científico, de una manera lúdica, a públicos de todas las edades y despertar la curiosidad por la ciencia, especialmente en los niños.

La propuesta para el desarrollo de las actividades de divulgación, como las demostraciones y experimentos presentadas en este trabajo, puede basarse en la estimulación de las capacidades imaginativas más allá de simplemente concretarse a dar definiciones a través de ejemplos. En este sentido, las actividades hacen patente que en los participantes se pueden ejercitar o estimular diversas capacidades como la observación, el cuestionamiento, la formación de patrones, hacer conexiones entre los diversos conceptos e ideas y emprender acciones poniendo a prueba sus ideas.

Estas consideraciones se basan en la filosofía de LCE. Así pues, como proyectos a futuro se tiene precisamente la medición el impacto de las demostraciones y experimentos en el público. Típicamente, en las funciones de El Circo de la Física se ha vuelto complicado implementar algunas estrategias para valorar el efecto de las actividades. Ya se ha pensado en poner pre exámenes para ser comparados con exámenes de salida. Esto se puede hacer de manera cualitativa en el caso de grupos pequeños y pruebas similares podrían ser diseñadas para las funciones con un mayor número de asistentes con el fin de tener valoraciones cuantitativas.

La situación actual de la pandemia del COVID-19 llevó a cancelar todas las presentaciones programadas en 2020 y algunas de 2021, por lo que no se tuvo la oportunidad de empezar a hacer las mediaciones de valoración. Por otro lado, una vez que la situación mejore, se podrá empezar a aplicar cuestionarios diseñados a manera de cuadernillos de trabajo, con hojas que se puedan desprender, para ser usadas con instrumentos de medición y valoración de los experimentos de acuerdo con el tema tratado en la demostración. Los instrumentos de valoración pueden ser fácilmente integrados a los cuadernillos que ya se reparten en programas de divulgación. Se espera tener resultados favorables a partir de las mediciones que se hagan en las funciones de El Circo de la Física a partir de 2022.

Otra de las tareas pendientes en el desarrollo de las actividades de El Circo de la Física es que las funciones sean inclusivas para todo público. Como se ha mencionado, en la enseñanza se deben establecer estrategias que in-

volucren el vocabulario accesible para todos, además de las que consideren a personas con algunas capacidades físicas o cognitivas diferentes. Es por esto que se estima que las diversas formas de expresión corporal y de comunicación pueden ser de beneficio en estos casos.

Cabe señalar que parte del éxito de las actividades dependen de la capacidad de adaptarse a las circunstancias y a las nuevas tecnologías. Los experimentos y su presentación han ido evolucionado con el paso de los años para hacerlos más llamativos y fáciles de entender, siempre ofreciendo la oportunidad de que cualquier familia o escuela pueda reproducir alguna versión de lo que se les presenta. En este sentido, El Circo de la Física es una estrategia de divulgación científica que habrá de seguir contribuyendo en la formación de los futuros científicos de nuestro país.

REFERENCIAS

- [1] “UCSB Physics Circus”. UCSB.edu. <https://circus.physics.ucsb.edu> (acceso: abr. 1, 2022).
- [2] “The Physics Circus”. UTexas.edu. <https://web2.ph.utexas.edu/~circus/> (acceso: abr. 1, 2022).
- [3] “Physics Circus”. Utrgv.edu. <https://www.utrgv.edu/physics/outreach/circus/index.htm> (acceso: abr. 1, 2022).
- [4] “U of M Physics Circus brings large-scale stunts and physics fun to the public Jan. 14”. Umn.edu. <https://cse.umn.edu/college/news/u-m-physics-circus-brings-large-scale-stunts-and-physics-fun-public-jan-14> (acceso: abr. 1, 2022).
- [5] J. W. Walker, *The Flying Circus of Physics*, 2.^a ed. Hoboken, Estados Unidos: John Wiley & Sons, 2007.
- [6] “Lincoln Center”. Aboutlincolncenter.org. <http://www.aboutlincolncenter.org/education-community/lincoln-center-education> (acceso: abr. 1, 2022).
- [7] “The AMS Four Year Experience”. Newvisions.org. <https://www.newvisions.org/ams/pages/the-ams-four-year-experience> (acceso: abr. 1, 2022).
- [8] J. van der Veen, “Draw Your Physics Homework? Art as a Path to Understanding in Physics Teaching”, *Am. Educ. Res. J.*, vol. 49, no. 356, 2012, doi: 10.3102/0002831211435521.

- [9] L. Colletti, “Teaching the Nature of Physics Through Art: a New Art of Teaching”, *Phys. Ed.*, vol. 53, no. 1, 2017.
- [10] National Research Council (U.S.), *Physics in a new era: a overview*. Washington, D.C., Estados Unidos: National Academy Press, 2011.
- [11] G. White, “Teaching: Art, craft, science? Yes!”, *Phys. Teach.*, vol. 52, no. 328, 2014, doi: 10.1119/1.4893083.
- [12] “Lincoln Center Institute”. Wordpress.org. <https://imaginationnow.files.wordpress.com/2011/03/capacities.pdf> (acceso: abr. 1, 2022).
- [13] “Lincoln Center Education Teacher Guide”. PBS.org. https://bento.cdn.pbs.org/hostedbento-prod/filer_public/live_lincoln_center/2018-19_Season/Pipeline_Education_Guide.pdf (acceso: abr. 1, 2022).
- [14] J. R. Lakowicz, *Principles of fluorescence spectroscopy*. Nueva York, Estados Unidos: Plenum Press, 1983.
- [15] F. S. Crawford, “Singing Corrugated Pipes”, *Am. J. Phys.*, vol. 42, no. 278, 1974, doi: 10.1119/1.17600.
- [16] M. J. Ruiz y R. Berls, “Vacuum cleaner isolates over 12 harmonic in the corrugated whistling tube”, *Phys. Ed.*, vol. 55, no. 3, 2020, doi: 10.1088/1361-6552/ab753d.
- [17] S. Serafin y J. Kojs, “The voice of the dragon: a physical model of a rotating corrugated tube”, en *Proc. of the 6th Conf. on Digital Audio Effects (DAFx-03)*, Londres, Inglaterra, sept. 8-11, 2003.
- [18] M. J. Ruiz, “Boomwhackers and End-Pipe Corrections”, *Phys. Teach.*, vol. 52, no. 73, 2014, doi: 10.1119/1.4862106.
- [19] T. Müller, “Numerical Chladni figures”, *Eur. J. Phys.*, vol. 34, 2013, doi: 10.1088/0143-0807/34/4/1067.
- [20] J. Dixon Mann, “An Improved Method of Projecting Lissajous’ Figures on the Screen”, *Nature*, vol. 18, 1878, doi: 10.1038/018024a0.
- [21] E.A. Cech y T. Waidzunas, “STEM Inclusion Study”. APS.org, <https://www.aps.org/publications/apsnews/201806/upload/STEM-Inclusion-Study-Climate-Report.pdf> (acceso: abr. 1, 2022).