



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

Proyecto de Innovación

Convocatoria 2020/2021

Nº de proyecto: 210

Física, Matemáticas y la Música

Responsable del proyecto:

Ángel Rivas Vargas

Facultad de Ciencias Físicas
Departamento: Física Teórica

1. Objetivos propuestos en la presentación del proyecto

Los objetivos del presente proyecto son:

- 1.- Comprender de manera sencilla los principios físicos de la música.
- 2.- Entender y resolver las ecuaciones básicas que describen el funcionamiento de los instrumentos musicales.
- 3.- Apreciar la aplicación de la teoría de grupos para analizar propiedades básicas de simetría en música y armonía.
- 4.- Explicar al estudiante el papel del fenómeno musical en la historia de la física y las matemáticas.
- 5.- Mejorar la comprensión de las matemáticas que se imparten en el Grado en Física, así como incentivar al alumnado para su estudio.
- 6.- Fomentar la participación e intervención activa de los estudiantes en el diseño de su propia experiencia educativa.
- 7.- Incrementar la integración del alumnado en procesos organizativos y entornos colaborativos.
- 8.- Introducir a los estudiantes en la actividad divulgativa a nivel universitario.
- 9.- Fomentar la interacción entre física teórica y experimental.
- 10.- Potenciar el interés por la música y las disciplinas humanísticas en los estudios de ciencias.
- 11.- Incentivar el desarrollo del software libre entre la comunidad universitaria.
- 12.- Fomentar la comunicación entre los diversos colectivos de la universidad.

2. Objetivos alcanzados

La mayoría de objetivos planteados se han podido desarrollar sin incidencias. Si bien, los que implicaban más participación del alumnado y los que incluían demostraciones de cátedra, no han podido llevarse a cabo de forma presencial a consecuencia de las distintas medidas sanitarias que han terminado afectando a todo el curso 2020-21. Con todo, y como estaba contemplado, se ha suplido esta deficiencia con la elaboración de material audiovisual que se ha proyectado en clase y compartido a través de campus virtual de la UCM tal y cómo se detalla en secciones posteriores.

El proyecto se ha desarrollado principalmente en la asignatura de Métodos Matemáticos II del Grado en Física, y también en la asignatura de Partículas Elementales, dónde además hay alumnado del Doble Grado Física-Matemáticas. Dentro de la asignatura de Métodos Matemáticos II, los estudiantes han podido aprender los principios físicos de la música mientras estudiaban la resolución de la ecuación de

onda en diversas dimensiones y geometrías (objetivos 1 y 2). La respuesta del alumnado ha sido muy buena, muchos de los estudiantes han mostrado interés por el tema, e incluso han expresado su inquietud por profundizar más, explorando cuestiones, suscitadas a raíz de la exposición del profesor, que rebasaban el alcance de la materia tratable dentro un curso de física matemática de segundo año de grado.

Por otra parte, en el trabajo llevado a cabo en la asignatura de Partículas Elementales, los estudiantes tuvieron la posibilidad de participar e intervenir activamente mediante la presentación de proyectos acerca de las aplicaciones de la teoría de grupos en música (objetivo 3).

La ejecución del proyecto de innovación en las dos asignaturas ha proporcionado una visión del fenómeno musical en el desarrollo de la física y las matemáticas (objetivo 4), que cubre desde la armonía pitagórica a las series de Fourier y la teoría de grupos, mejorando la comprensión de estas herramientas matemáticas indispensables en física (objetivo 5).

En el desarrollo del proyecto los estudiantes han tenido un papel primordial, integrándose en procesos colaborativos con uso de software libre, haciéndose partícipes de su propia experiencia educativa (objetivos 6, 7 y 11), e introduciéndose además en la actividad divulgativa a nivel universitario (objetivo 8). En este sentido, se ha potenciado el interés por las disciplinas humanísticas en un grado de ciencias experimentales (objetivo 10), así como la conexión entre física teórica y matemática y física experimental, con la realización de demostraciones de cátedra (objetivo 9).

Finalmente, la colaboración de estudiantes de grado, máster y doctorado junto con personal de administración y servicios y personal docente e investigador en el equipo del proyecto, ha fomentado la implicación de diversos colectivos de la universidad en torno a un objetivo común (objetivo 12).

3. Metodología empleada en el proyecto

La metodología seguida en la asignatura de **Métodos Matemáticos II** comprendía el desarrollo de tres actividades principalmente.

Las dos primeras se han implementado según se iba cubriendo el temario de la asignatura. Al llegar a la altura adecuada, se dedicó un tiempo en clase a explicar los principios físicos y matemáticos de la música, enfatizando la relación entre el análisis de Fourier y la armonía, las distintas escalas, etc. Estas explicaciones se complementaron con vídeos que incluían demostraciones de cátedra con cuerdas vibrantes, un violoncelo, distintas flautas, y otros aparatos, que no podían hacerse en clase debido a las normas de docencia semipresencial que han regido durante el curso. También se visualizó un vídeo con un análisis de Fourier de distintos instrumentos realizado con software libre.

La tercera actividad consistió en proponer a los estudiantes la resolución de la ecuación de onda en distintas geometrías correspondientes a distintos instrumentos musicales. Uno de estos ejercicios se planteó como un problema de entrega para ser calificado dentro del apartado "otras actividades de evaluación" previsto hasta en un porcentaje máximo del 35%, aunque siempre de forma voluntaria para los alumnos, pudiendo elegir una evaluación alternativa en la que no computen los resultados de esta actividad. Finalmente se proporcionó al alumnado soluciones detalladas de todos estos ejercicios para que tuvieran la oportunidad de autoevaluarse y aprender de estas

aplicaciones específicas de la física y las matemáticas vistas en clase, en el ámbito del sonido y la música.

En la asignatura de **Partículas Elementales** se comenzó por asignar un proyecto relacionado con la música de manera voluntaria. En este sentido cabe destacar el proyecto titulado “Estructuras algebraicas en armonía musical”. Fue realizado por la estudiante María Aguado Yáñez, que por su dedicación e implicación en la actividad, ha sido finalmente incluida en el proyecto.

Este proyecto se ha centrado en la identificación e interpretación de diferentes estructuras algebraicas que pueden definirse dentro de la música. Esta es una de las maneras más directas que puede relacionarse la música con la estructura matemática de simetrías que es inherente a la física de partículas. En este sentido, analizó la existencia de estructuras abstractas en la música, que se realiza de forma permanente en la composición de la armonía.

4. Recursos humanos

Este proyecto ha contemplado la colaboración activa de un grupo de profesores, personal de administración y servicios y de estudiantes como se ha mencionado anteriormente. El grupo de profesores seleccionados lo ha sido por poseer la suficiente experiencia y cualidades para desarrollar el proyecto.

En primer lugar, el profesor coordinador Ángel Rivas Vargas ha impartido cuatro años la asignatura de Métodos Matemáticos II en varios grupos, imparte también clases de Laboratorio de Física General a alumnos del Grado en Química, y es el coordinador del Laboratorio de Física General para los estudios de la Facultad de Ciencias Químicas. Ha coordinado el proyecto de innovación docente “Métodos Matemáticos de la Física y la Música” (2019/20), del que el presente proyecto ha sido continuación, y posee 7 años en formación musical (especialidad canto) en escuelas de música en Madrid, y en la Musikschule Neu-Ulm (Baviera, Alemania), así como conocimientos básicos de piano y guitarra clásica.

El profesor José Alberto Ruiz Cembranos imparte la clase de Partículas Elementales desde el curso 2016/2017, ha participado en el proyecto de innovación docente “Métodos Matemáticos de la Física y la Música” (2019/20), y ha sido coordinador de otros dos proyectos de innovación docente: “Software libre como herramienta de aprendizaje en mecánica” (2017/18) y “Formación en software libre mediante proyectos de mecánica” (2018/19). También ha participado en experiencias similares a las de innovación docente como PDI externo, en la Universidad de Colima, México (amparado por la financiación de las becas para profesores por convenio) y en la Universidad de Lisboa, Portugal (financiado por el programa Erasmus para la movilidad de profesores universitarios). Por otra parte, es licenciado en Comunicación Audiovisual por la UCM.

El ingeniero técnico Fernando Rodrigo Somolinos del Laboratorio de Electricidad y Magnetismo del Departamento de Física de Materiales, especialista en impresión 3D, ha colaborado en el proyecto en la puesta a punto y mantenimiento del equipo informático, aparatos electrónicos, prototipos e impresión 3D. Posee formación musical básica en guitarra.

La estudiante de doctorado (contratada predoctoral FPU) Clara Álvarez Luna, ha impartido 15 horas por “venia docendi” en la asignatura de Partículas Elementales junto

con el profesor José Alberto Ruiz Cembranos. Es titulada de Grado Profesional de Piano en la Especialidad de Composición, por el Real Conservatorio Superior de Música de Madrid.

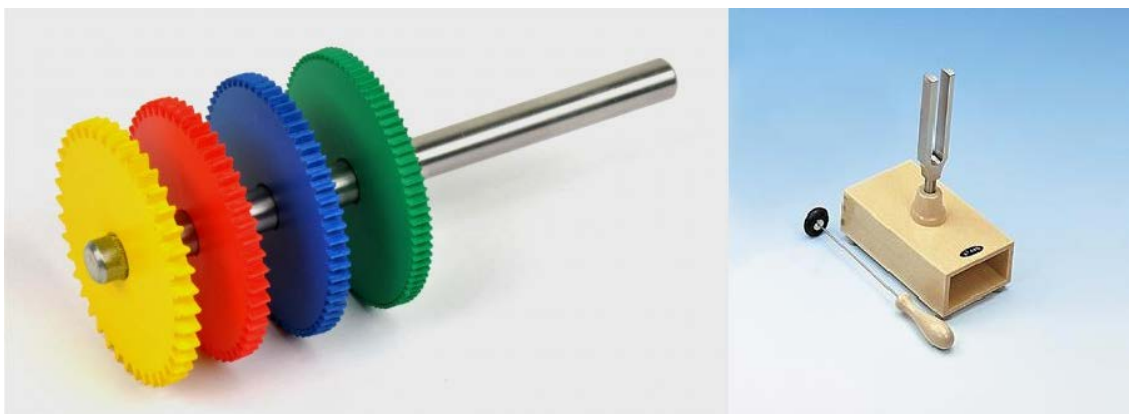
El estudiante del Máster de Matemáticas Avanzadas de la Facultad de Matemáticas de la UCM, y exalumno del Doble Grado en Física y Matemáticas, Joaquín Domínguez de Tena ha participado en el análisis y puesta a punto del material desde la parte musical. Es celista en la orquesta de la UCM desde el año 2016. Título de Grado Profesional de Violoncelo con Especialización en Composición, por el Real Conservatorio Superior de Música de Madrid. Ha participado en diversos cursos orquestales con el maestro internacional George Pehlivanian, con repertorio orquestal de alta dificultad (9ª Sinfonía de Dvorak, 9ª Sinfonía de Beethoven, 1ª Sinfonía de Brahms, 4ª Sinfonía de Tchaikovsky) y conciertos finales en el Auditorio Nacional de Música en Madrid. También ha participado en diversas clases magistrales de violoncelo con las maestras María Macedo y Arancha López. Ha sido miembro temporal de la orquesta de la KTH (Suecia), tocando en lugares como el Ayuntamiento de Estocolmo, la sala de conciertos de Estocolmo, Musicaliska o la Kungliga Musikhögskolan (Real Conservatorio de Estocolmo).

Por último, el equipo de trabajo se completa con la estudiante de grado María Aguado Yáñez, incorporada al proyecto una vez empezado el mismo, con formación en canto, piano y guitarra, que ha participado en las actividades de la asignatura de Partículas Elementales y en Métodos Matemáticos II generando un vídeo sobre series de Fourier y música.

5. Desarrollo de las actividades

Aunque las actividades desarrolladas en este proyecto han estado principalmente enfocadas a alumnos del Grado en Física y Doble-Grado en Física y Matemáticas, a través de las asignaturas de Métodos Matemáticos II (segundo curso) y Partículas Elementales (cuarto curso), pueden adaptarse a otras asignaturas de ciencias, tanto teóricas como de laboratorio mediante la correspondiente revisión y adecuación de contenidos.

En primer lugar, se destinó la dotación económica del proyecto en adquirir material didáctico complementario para las demostraciones de cátedra. Éste consistió en un montaje con motor y rueda de Savart (a la izquierda en la figura que sigue), y en un diapasón de 440 Hz con caja de resonancia macillo (a la derecha en la figura siguiente):



Paralelamente, y con ayuda del técnico del Laboratorio de Electricidad y Magnetismo del Departamento de Física de Materiales, Fernando Rodrigo Somolinos, se inició un proyecto de impresión 3D de flautas y flautines. Se imprimieron prototipos de flauta dulce y quena, en los cuales no se logró conseguir la afinación suficiente para poder emplearlos con fines musicales. Se planteó entonces un prototipo de flauta de Pan, que sí resultó afinada, y se imprimieron dos modelos más (véase la figura de abajo) de distintos tamaños para apreciar el efecto de la longitud y el (no-)efecto de la sección sobre la afinación del sonido.



Cuando todo el material estuvo disponible, se grabaron una serie de videos con demostraciones de cátedra. En esta actividad participó activamente el estudiante de máster Joaquín Domínguez de Tena, celista en la orquesta de la UCM. Se generaron un total de 8 vídeos cortos con la siguiente temática:

1. *Armónicos en la cuerda vibrante.* Consiste en la visualización de los diferentes armónicos en un montaje con un generador de señal y una cuerda de algodón.
2. *Monocordio y diapasón.* Con ayuda de este material se ilustra la armonía del sonido a través de consonancias y disonancias obtenidas en cuerdas de distintas longitudes.
3. *Batidos en violoncelo.* Se aprecia el fenómeno de batidos en el violoncelo con ayuda de un diapasón.
4. *Armónicos en violoncelo.* Se indica cómo un músico genera distintos sonidos en el violoncelo jugando con el armónico principal excitado según la posición de sus dedos.
5. *Oscilación forzada en violoncelo.* Dependiendo de si el celista toca con el arco o toca en pizzicato el sonido se ve afectado porque matemáticamente la ecuación de ondas posee o no un término inhomogéneo y satisface distintas condiciones iniciales.
6. *Ruedas de Savart.* Se explica cómo medir de manera mecánica, mediante ruedas dentadas, la frecuencia fundamental de vibración del sonido de un instrumento musical.
7. *Resonancia en violoncelo.* Se ilustra el fenómeno de resonancia generado al emitir una determinada nota (llamada "lobo") con la cuerda de un violoncelo, correspondiente a la frecuencia natural de resonancia de la caja.
8. *Flauta de Pan.* Se aprecia el efecto de la longitud y la sección en el sonido de un instrumento de viento.

En la realización de estas demostraciones también se utilizó material adquirido en el proyecto de innovación docente “Métodos Matemáticos de la Física y la Música” (2019/20), así como material propio del Laboratorio de Física General de la Facultad de Ciencias Físicas.

Por otra parte, la estudiante de grado, María Aguado Yáñez, que cursaba la asignatura de Partículas Elementales, se ofreció además a crear contenidos para la clase de Métodos Matemáticos II. Así que se solicitó su incorporación en el equipo del proyecto a la oficina de calidad de la UCM. María realizó un vídeo explicativo acerca del efecto de las componentes de Fourier de una señal periódica sobre el timbre del sonido, con varios ejemplos que incluían una guitarra, un piano y un sintetizador digital, y empleando software libre de análisis espectral.

Todo este material audiovisual se subió al espacio de la asignatura de Métodos Matemáticos II en el campus virtual de la UCM. Según se iban introduciendo los diferentes conceptos en las clases magistrales, se permitió al alumnado acceder a estos contenidos, visualizado, en parte, en las propias clases magistrales.

Posteriormente, cómo se ha indicado en la metodología, se propuso a los estudiantes la resolución de diferentes ejercicios dentro del contenido cubierto por la asignatura, que estuvieran enfocados a una aplicación en música. En particular, tuvieron la oportunidad de resolver la ecuación de ondas para una cuerda de guitarra, una flauta, un clarinete y una cavidad esférica resonante. Finalmente se compartieron las soluciones detalladas de estos problemas con el alumnado.

En la asignatura de Partículas Elementales se desarrollaron las actividades conforme al guion previsto. Una vez identificados los estudiantes que realizarían un trabajo asociado a este proyecto de innovación, comenzaron sus diseños particulares. Las distintas consultas desembocaron en proyectos, en los que hubo una aproximación teórica y un planteamiento analítico y/o numérico. Por ejemplo, y en relación con el proyecto que ya destacamos en la Sección 3, titulado “Estructuras algebraicas en armonía musical” y realizado por María Aguado Yáñez, se analizaron distintas simetrías y estructuras algebraicas presentes en la música. Además, se comentaron otro tipo de aspectos, como la fuerte relación entre rítmica y proporciones numéricas, el problema de las ecuaciones diferenciales y la secuenciación de Fourier asociado a la naturaleza ondulatoria del sonido, o sus consecuencias con respecto a la textura sonora y al tratamiento de su intensidad.

Finalmente, resulta interesante destacar que, en el desarrollo de las actividades anteriormente descritas, se contó con participación de distintos colectivos de la Facultad de Ciencias Físicas de la UCM:

- Personal docente e investigador (PDI).
- Personal de administración y servicios (PAS).
- Estudiantes de doctorado.
- Estudiantes de máster.
- Estudiantes de grado matriculados en las asignaturas de Métodos Matemáticos II y Partículas Elementales.