



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

Proyecto de Innovación

Convocatoria 2023/2024

Nº de proyecto: 39

Título del proyecto: C4P: Computación Cuántica en las Clases de la Complutense

Nombre del responsable del proyecto:

Ángel Rivas Vargas

Centro: Facultad de Ciencias Físicas

Departamento: Física Teórica

1. Objetivos propuestos en la presentación del proyecto.

1. Ayudar a alumnos de nivel 3º de grado y superior a comprender los principios de la información cuántica e iniciarles en el procesado cuántico de la información en ordenadores cuánticos reales. Responde a la necesidad de una formación introductoria para capas del personal investigador en España más amplias que el puñado de especialistas que trabajan en computación cuántica.

2. Complementar la formación del alumnado con contenido práctico en la disciplina emergente de la información y computación cuántica, familiarizando al estudiante con lenguajes como QISKIT diseñados para la programación de ordenadores cuánticos pequeños. Responde a la necesidad de introducir contenidos pedagógicos prácticos en enseñanzas de áreas de estudio, como el Máster de Física Teórica o la orientación de Física Fundamental del Grado en Física, que tienden por sí mismas a un predominio muy grande de contenidos puramente teóricos.

3. Incentivar al alumnado para el estudio de la Mecánica Cuántica y animar a los estudiantes a participar activamente en el diseño de sus propias experiencias de aprendizaje. Responde al reto de motivar a las personas actualmente recibiendo en el aula magistral una docencia abstracta y fuertemente matemática para que vean que tiene utilidad práctica y evitar que pierdan el interés en realizar el esfuerzo que requiere alcanzar nuevas cotas educativas.

4. Integrar a los estudiantes en procesos organizativos y entornos colaborativos interdisciplinarios. Intenta abordar el problema del aislamiento de los estudiantes, facilitando su inclusión en un grupo, promoviendo el respeto al trabajo de los demás independientemente de sus circunstancias personales y académicas y estimulando su aportación al esfuerzo común, así como su conocimiento de pares en otras disciplinas.

2. Objetivos alcanzados.

La mayoría de objetivos planteados se han podido desarrollar satisfactoriamente sin mayores incidencias.

Los estudiantes del 3^{er} curso del Grado en Física (y Doble Grado Matemáticas-Física) que voluntariamente mostraron su interés en participar, han tenido la oportunidad de hacerlo. Han aprendido conceptos básicos de computación cuántica a nivel práctico a través de varias sesiones de laboratorio, que han complementado la instrucción teórica recibida dentro del temario reglado de la asignatura de Mecánica Cuántica (objetivos 1 y 2).

De hecho, el proyecto ha tenido una muy alta demanda de participación, con un total de 53 estudiantes inscritos, mostrando un notable interés en profundizar en el conocimiento de la materia, que ha facilitado su asimilación a través del contenido práctico (objetivo 3). Así mismo, los estudiantes han tenido que interaccionar con sus compañeros frecuentemente y trabajar en equipo (objetivo 4) en alguna de las actividades de mayor complejidad y que hubieran requerido, además, de un tiempo de cálculo a nivel individual mayor del que podíamos sufragar con el presupuesto otorgado. Además, los participantes tuvieron la oportunidad de interactuar con estudiantes de ingeniería de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación (ETSIST) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), fomentando que ambos colectivos intercambiaran conocimientos entre Física Fundamental e Ingeniería Aplicada.

En este sentido, en el desarrollo del proyecto, los estudiantes han tenido un papel primordial, integrándose en procesos colaborativos (objetivo 4), también se les ha incentivado en el uso de software libre, como Python, y han adquirido competencias básicas de ecosistemas Cloud, necesarias para ejecutar cálculos en los servidores de IBM. Además, a través de esta iniciativa, se ha potenciado el interés en el alumnado por la conexión entre física teórica y matemática y física experimental.

Finalmente, la colaboración de estudiantes de grado 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.

3. Metodología empleada en el proyecto.

El proyecto se desarrolló principalmente a través de tres sesiones presenciales de dos horas como máximo de duración en el Laboratorio de Física Computacional del Departamento de Física Teórica. Para ello se elaboraron tres guiones detallados los cuales se les facilitaron a los estudiantes de antemano. En cada sesión de laboratorio los estudiantes debían completar una serie de tareas detalladas en cada guion, contando con la presencia de uno o dos instructores que atendían a dudas y les ayudaban a progresar.

Al final de estas tres sesiones los estudiantes entregaron una memoria de las actividades realizadas que fue revisada por los instructores.

Para la realización del proyecto, y a fin facilitar la comunicación entre instructores y estudiantes, y entre los estudiantes entre sí, se creó un espacio en el campus virtual de la UCM con todo el personal involucrado. En él, se fueron comunicando los avisos, los guiones, y habilitando la tarea final donde los participantes presentaron su memoria de laboratorio y recibieron el feedback de los instructores.

Además a todos los estudiantes se les abrió una cuenta personal en el ecosistema IBM Cloud, una vez adquirido tiempo de cálculo con el presupuesto asignado al proyecto, y al programar sus rutinas aprendieron a llamar a servidores, generar claves de API, etc. También se les enseñó a crear una cuenta IBM quantum gratuita, con tiempo de cálculo limitado, para que pudieran seguir realizando pequeñas pruebas con lo que aprendieron luego de finalizar las actividades del proyecto.

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 UCM está compuesto por los tres que han impartido la asignatura de Mecánica Cuántica durante el curso 2023/24:

- Ángel Rivas Vargas, el profesor responsable, ha coordinado el proyecto. Anteriormente fue profesor responsable de dos proyectos de innovación docente “Métodos Matemáticos de la Física y la Música” (2019/20) y “Física y Música”

(2020/21), y participó en otros dos “La Física y los Medios Audiovisuales” (2021/22) y “Autoproducción de material audiovisual de libre acceso para la docencia universitaria” (2022/23), así como en el proyecto de aprendizaje servicio “Fomento de vocaciones STEM en colectivos sociales infrarrepresentados” (2022/23).

- Felipe Llanes-Estrada ha participado en las sesiones de información, laboratorio, escritura de guiones, etc. Fue profesor responsable en los proyectos de innovación docente “Adaptación del laboratorio de Electrodinámica Clásica al programa de Grado en Física dentro del EEES” (2009-10) y “LHC@Complutense, Análisis de datos de física de altas energías en el Grado en Física y el Máster en Física Teórica” (2015-16). Además, participó en “Métodos innovadores para la docencia en Física Nuclear y de Partículas” (2007-08), “Software libre como herramienta de aprendizaje en mecánica” (2017-18), y “Formación en software libre mediante proyectos de mecánica” (2018-19).
- Antonio Dobado González, ha colaborado en la sesiones informativas y la organización de equipos. Fue profesor participante en el proyecto “LHC@Complutense, Análisis de datos de física de altas energías en el Grado en Física y el Máster en Física Teórica” (2015-16).

Por otra parte, el equipo ha contado con la participación activa de dos estudiantes de doctorado, Juan José Gálvez Viruet (contratado FPU) e Ignacio González Castro (contratado FPI) que han ayudado en la supervisión y atención a los estudiantes participantes.

El equipo UCM se completa con el ingeniero técnico David Fernández Sanz, que ha proporcionado apoyo en el plano informático, y que ha formado parte del equipo de siete proyectos de innovación docente: “Cursos de formación, desarrollo de material docente y estudio de viabilidad de la implantación de software libre de uso científico en la Universidad” (2009/10), “Desarrollo de material docente basado en herramientas de software libre” (2010/11), “Software libre como herramienta de aprendizaje en mecánica” (2017-18), “Formación en software libre mediante proyectos de mecánica” (2018-19), “Métodos Matemáticos de la Física y la Música” (2019/20), “La Física y los Medios Audiovisuales” (2021/22), y “Autoproducción de material audiovisual de libre acceso para la docencia universitaria” (2022/23).

Finalmente el proyecto se ha beneficiado de la participación externa del Departamento de Matemática Aplicada a las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de la UPM. En particular, Rafael Delgado López, Rafael Hernández Heredero (Subdirector del Depto.) y Luis Miguel Pozo Coronado. Estos profesores han colaborado en la redacción de guiones, adaptado el contenido y actividades de la UCM a su alumnado.

5. Desarrollo de las actividades

En primer lugar, se destinó la dotación económica del proyecto a adquirir tiempo de cálculo en los servidores cuánticos de IBM. Se eligió esta compañía por ser una multinacional y pensando en la facilidad de facturación con la Administración Pública. Sin embargo, la política de pago mensual por suscripción que actualmente desarrolla la empresa complicó enormemente la contratación de los servicios, que no se activaron de forma efectiva hasta principios del año 2024.

Paralelamente a este trámite se fueron escribiendo los guiones para las prácticas de laboratorio por los profesores implicados, los estudiantes de doctorado y el personal de la UPM. Se hicieron tres guiones, uno para cada sesión de laboratorio, y dos hojas de Python con campos que los estudiantes debían ir completando.

Con la ayuda del ingeniero técnico David Fernández, se prepararon los equipos informáticos del Laboratorio del Física Computacional con las últimas versiones del software Python y los paquetes requeridos para la conexión con la nube de IBM, así como la ejecución circuitos cuánticos basados en la librería QISKIT tanto en emuladores como en máquinas cuánticas.

Coincidiendo con el comienzo del segundo semestre a finales de enero, se organizaron dos reuniones informativas (mañana/tarde) para los estudiantes de Mecánica Cuántica que tuvieran interés en participar en el proyecto. Después se abrió un formulario para que aquellos estudiantes finalmente decididos a participar pudieran inscribirse. Se obtuvieron un total de 53 solicitudes, de los cuales 42 fueron hombres y 11 mujeres.

En el formulario los estudiantes debían indicar la preferencia de días/horas para las sesiones de laboratorio. Con esta información se elaboraron tres equipos a fin de no excluir a ningún estudiante interesado en participar, y se planearon las tres sesiones para cada equipo.

La primera sesión se llevó a cabo a finales del mes de marzo, en ella se les introdujo a los estudiantes conceptos básicos de circuitos cuánticos a través de la interfaz visual QUIRK (<https://algassert.com/quirk>). En esta sesión los estudiantes se familiarizaron con:

1. Estructuras elementales de circuitos cuánticos: puertas lógicas y medidas.
2. Puertas básicas de un qubit: not, Hadamard, Paulis.
3. Puertas unitarias más generales, concepto y ejemplos: inversas de puertas básicas y rotaciones arbitrarias.
4. Puertas lógicas de más de un qubit: puertas controladas, puerta CNOT, puerta SWAP.
5. Preparación de estados de Bell.
6. Comprobación del teorema de no-clonación.

Tras el parón vacacional de la Semana Santa, se realizaron la segunda y tercera sesión a lo largo del mes de abril. En la segunda sesión, se introdujo al alumnado al paquete QISKIT en Python a través de una serie de ejercicios donde tuvieron la oportunidad de simular circuitos cuánticos sencillos, en particular, el durante la segunda sesión los estudiantes aprendieron a:

1. Abrir una cuenta gratuita en IBM quantum lab.
2. Inicializar QISKIT en un Jupyter notebook.
3. Definir circuitos cuánticos en QISKIT.
4. Inicializar registros de qubits.
5. Definir medidas en la base computacional.
6. Ejecutar circuitos cuánticos en un simulador clásico.
7. Simular un circuito cuántico generador de números aleatorios.
8. Simular la transformada de Fourier cuántica en circuitos de hasta 5 qubits.

Finalmente, en la tercera y última sesión, los estudiantes tuvieron la oportunidad de ejecutar circuitos definidos en QISKIT en una máquina cuántica real. En concreto

tuvieron acceso a tres procesadores de 127 qubits disponibles en línea a través del ecosistema IBM Cloud: los modelos “Brisbanne”, “Kyoto” y “Osaka”. Con ello, pudieron:

1. Familiarizarse con conceptos básicos del ecosistema IBM Cloud: apertura de cuentas, acceso a servicios de cálculo, generación de claves de API, etc.
2. Comprender las funciones “primitives” de QISKIT: “sampler” and “estimator”.
3. Ejecutar un circuito cuántico de generación de números aleatorios.
4. Comprobar experimentalmente la violación de la desigualdad de Bell-CHSH en un circuito cuántico.
5. Ejecutar el algoritmo de Deutsch e introducirse en el concepto de “ventaja cuántica”.
6. Entender el mecanismo de listas de espera en máquinas de cálculo y a acceder a los resultados remotamente.

Estas sesiones se desarrollaron con la ayuda de los estudiantes de doctorado que intervinieron directamente en el laboratorio, supervisando a los estudiantes, atendiendo sus posibles dudas, y explicando conceptos.

Tras la conclusión de la sesiones prácticas, se le solicitó al alumnado participante que escribiera una breve memoria de laboratorio, con sus resultados y un sucinto análisis, así como un comentario acerca de su experiencia de participación en el proyecto. Finalmente entregaron la memoria 44 estudiantes, la respuesta recibida acerca del proyecto ha sido muy buena, incentivándonos a repetir una experiencia similar en años venideros. En particular, los participantes destacaban lo útil que les parece poder aplicar los conceptos abstractos de la teoría cuántica a problemas concretos. Los estudiantes recibieron un diploma de participación.

Acabados los exámenes ordinarios del mes de mayo, se propuso a los participantes la posibilidad de grabar un breve vídeo explicando alguna actividad del proyecto. Estos vídeos están disponibles a través del canal de YouTube “Lecciones de Física en la Complutense” que edita el Prof. Felipe Llanes-Estrada (véase <https://youtu.be/1uPQu5SD3jU>)

Durante todo el desarrollo del proyecto, los estudiantes que participaron tuvieron la posibilidad de interactuar con estudiantes de la asignatura de nueva creación “Introduction to Quantum Computing” optativa en todos los planes de estudio de los grados oficiales de ingeniería impartidos por la ETSIST de la UPM. La idea que ambo alumnado pudiera intercambiar conocimiento desde un grado más fundamental, como es el de Física, a los grados aplicados de ingeniería.

En la ETSIST los profesores Rafael Delgado, Rafael Hernández y Luis Pozo, llevaron a cabo actividades paralelas con los guiones desarrollados por todo el equipo del proyecto, solo que adaptándolos finalmente a los alumnos de ingeniería. Se prestó especial atención a la elaboración de los enunciados de las prácticas de laboratorio, de manera que se permitiese el progreso autónomo por parte de los estudiantes, teniendo en cuenta la diversidad de procedencias, lo cual implicaba niveles de desempeño muy dispares tanto en el ámbito matemático como en el de la programación. Sobre un entorno Python, usando las librerías QISKIT, los estudiantes desarrollaron, en 10 sesiones prácticas de 100 minutos, simulaciones de teleportación cuántica, protocolo QKD, experimento CHSH, y desarrollos de los algoritmos de Deutsch, Deutsch-Jozsa, Bernstein-Vazirani, Simon, transformada de Fourier cuántica (para el algoritmo de Shor) y Grover. En particular, dividieron su intervención en 4 partes. El primer apartado, consistente en construir un estado cuántico entrelazado y medirlo, era bastante común a las prácticas desarrolladas en la UCM. No obstante, para los propósitos de las ingenierías de la UPM interesaba que el alumnado probase el rendimiento y limitaciones

de un ordenador cuántico con diversos algoritmos, a costa de una mayor necesidad de tiempo de cálculo en máquinas cuánticas. Por tanto, en la UPM se introdujeron 3 apartados adicionales que hacían uso de la transformada de Fourier cuántica. Los primeros dos apartados requerían sumar dos registros cuánticos que se encontraban en un estado entrelazado tal que su suma era conocida. Los ordenadores cuánticos de IBM se demostraron incapaces de generar una señal medible y separable del ruido. El último apartado requería aplicar un algoritmo de estimación de fase. Es decir, determinar los autovalores de un operador cuántico (unitario). En esta última ocasión, el ordenador cuántico sí era capaz de generar una señal medible. Al utilizar ordenadores cuánticos reales, el alumnado tuvo que enfrentarse a desafíos tales como no la disponibilidad por avería de parte de los ordenadores, esperas de cerca de una hora para recuperar los datos de la cola, pérdidas de resultados por errores en la administración de la cola, limitaciones presupuestarias para el acceso a los recursos,... Todos estos desafíos son propios del uso de recursos en la nube y es previsible que los egresados en las diversas ingenierías impartidas en la ETSIST se los encuentren en su desarrollo profesional. Estas actividades se realizaron al término de la asignatura y un total de 18 alumnos UPM se presentaron a las mismas. El proyecto de innovación docente facilitó también un Moodle común entre la UPM y la UCM, de forma tal que alumnos con unos conocimientos previos de ingeniería (UPM) y de Física (UCM) pudieron poner en común su experiencia.

Cronograma Resumen de Actividades

Periodo	Actividades	Responsables
Septiembre 2023-Enero 2024	Adquisición de tiempo cálculo en el servidor	A. Rivas (UCM).
Diciembre 2023-Febrero 2024	Elaboración de guiones	A. Rivas (UCM), F. Llanes (UCM), J. J. Gálvez (UCM), I. González (UCM), R. Delgado (UUP), R. Hernández (UPM).
Enero-Febrero 2024	Prepararon los equipos informáticos	David Fernández (UCM).
Enero-Febrero 2024	Reuniones informativas y formación de equipos.	A. Rivas (UCM), F. Llanes (UCM), A. Dobado (UCM), R. Hernández (UPM), L. Pozo (UPM).
Marzo-Mayo 2024	Sesiones de laboratorio y entrega de memorias	F. Llanes (UCM), J. J. Gálvez (UCM), I. González (UCM), A. Rivas (UCM).
Junio-Julio 2024	Preparación y difusión de material audiovisual	F. Llanes (UCM)