

Introducción a la Información Cuántica

12 de enero de 2024

Índice

1. IDENTIFICACIÓN DEL CURSO	1
1.1. Nombre y Código del Curso: Introducción a la Información Cuántica	1
1.2. Docentes	1
1.3. Ayudantes	1
2. DESCRIPCIÓN DEL CURSO	2
2.1. Objetivos de la Asignatura	2
2.2. Justificativa del Curso	2
2.3. Requisitos previos	3
2.4. Competencias del Perfil de Egreso Favorecidas en el Desarrollo del Curso	3
2.5. Metodología	4
2.6. Evaluación	5
3. CONTENIDOS DEL CURSO	6
4. BIBLIOGRAFÍA	8

1. IDENTIFICACIÓN DEL CURSO

1.1. Nombre y Código del Curso: Introducción a la Información Cuántica

1.2. Docentes

Prof. Dr. André T. Cesário, Prof. Dr. Teófilo Vargas Auccalla y Prof. Ricardo Angelo Quispe Mendizábal

1.3. Ayudantes

Dra. Carolina Perdomo y Juan Luna

2. DESCRIPCIÓN DEL CURSO

2.1. Objetivos de la Asignatura

Este curso proporcionará a los estudiantes una introducción sólida al fascinante campo de la Información Cuántica. La Información Cuántica es una disciplina interdisciplinaria que combina conceptos de fundamentos de física cuántica, teoría de la probabilidad, ciencia de la computación, computación científica y matemáticas. Exploraremos los principios fundamentales de la mecánica cuántica y sus posibles aplicaciones en el procesamiento, almacenamiento y transmisión de información cuántica.

2.2. Justificativa del Curso

Este curso se presenta como una pieza fundamental en la formación de los estudiantes, proporcionándoles las bases necesarias para comprender y aplicar los conceptos esenciales de la mecánica cuántica y la información cuántica en el contexto de la creciente revolución en la computación cuántica. La relevancia de esta formación se destaca por las siguientes razones:

1. **Preparación para la Revolución en Computación Cuántica:** En la era actual, la computación cuántica emerge como una revolución en el ámbito tecnológico. Este curso capacitará a los estudiantes con los conocimientos fundamentales necesarios para entender y contribuir a este emocionante avance, asegurando que estén equipados para enfrentar los desafíos y aprovechar las oportunidades que la computación cuántica presenta.
2. **Escasez de Recursos Didácticos en Español:** Actualmente, existe una escasez significativa de material educativo en español sobre información cuántica. La falta de libros y la limitada disponibilidad de profesores con estas calificaciones en América Latina dificultan el acceso a esta información crucial ¹. Esta situación destaca la importancia de ofrecer cursos en español como medio para democratizar el acceso a este conocimiento.
3. **Ausencia de Cursos en Español de esta naturaleza:** La ausencia de cursos en español que aborden la información cuántica con profundidad limita las oportunidades de aprendizaje para los estudiantes interesados en esta disciplina. Este curso busca llenar ese vacío educativo, ofreciendo un programa completo y accesible que permita a los estudiantes explorar y comprender a fondo la información cuántica en su propio idioma.

¹La experiencia del Prof. André, quien ha tenido la oportunidad de cursar cursos similares con expertos extranjeros (por ejemplo, con profesores del extranjero que han venido a Brasil a dictarlos: Vlatko Vedral, Profesor de Teoría de la Información Cuántica en la Universidad de Oxford y el Fernando G. S. L. Brandão, profesor de física en el Instituto Tecnológico de California, Caltech)

En resumen, la creación de este curso surge como respuesta a la necesidad imperante de proporcionar a los estudiantes las herramientas y conocimientos necesarios para enfrentar los desafíos y aprovechar las oportunidades que la revolución cuántica trae consigo. Además, la falta de recursos en español y la carencia de cursos de esta naturaleza destacan la importancia de esta iniciativa para fomentar el desarrollo académico y científico en nuestra región.

2.3. Requisitos previos

Este curso será autosuficiente y ha sido diseñado para estudiantes de física de todos los niveles. Sin embargo, se espera que los estudiantes de ingeniería, estadística, computación científica, ciencias de la computación, matemáticas e informática también puedan seguir este curso con algo de esfuerzo.

- El principal requisito previo del curso es la comprensión de Álgebra lineal desde la graduación de cualquier curso de ciencias exactas.

2.4. Competencias del Perfil de Egreso Favorecidas en el Desarrollo del Curso

La participación en el curso “Introducción a la Información Cuántica” favorecerá el desarrollo de diversas competencias en los estudiantes, contribuyendo así al perfil de egreso esperado. Algunas de las competencias clave que se potenciarán son:

1. **Competencias Analíticas:** Los estudiantes desarrollarán habilidades analíticas al comprender y aplicar los principios fundamentales de la mecánica cuántica en el contexto de la información cuántica. La capacidad para analizar problemas cuánticos y diseñar soluciones innovadoras se verá fortalecida.
2. **Habilidades de Resolución de Problemas Cuánticos:** Mediante la implementación de algoritmos cuánticos y la resolución de situaciones problemáticas teóricas y computacionales, los estudiantes adquirirán habilidades específicas para abordar y superar desafíos en el campo de la información cuántica y computación cuántica.
3. **Competencias en Investigación y Aplicación Práctica:** La evaluación de aplicaciones prácticas en el ámbito de la información cuántica permitirá a los estudiantes desarrollar competencias en investigación y aplicación de conocimientos teóricos a problemas actuales de investigación.
4. **Habilidades de Comunicación Científica:** La participación activa en discusiones científicas fomentará habilidades de comunicación científica, permitiendo a los estudiantes expresar sus ideas de manera clara y fundamentada en el contexto de la información cuántica.

5. **Capacidad de Adaptación Tecnológica:** Dado que el curso aborda los fundamentos de la computación cuántica, los estudiantes desarrollarán la capacidad de adaptarse a tecnologías emergentes, preparándolos para afrontar los retos y aprovechar las oportunidades en el panorama tecnológico actual.
6. **Actitud Crítica y Reflexiva:** A través de la exploración de conceptos avanzados y la evaluación de aplicaciones prácticas, los estudiantes cultivarán una actitud crítica y reflexiva, promoviendo la capacidad de cuestionar, analizar y contextualizar la información cuántica en diversos escenarios.

La combinación de estas competencias contribuirá a un perfil de egreso enriquecido, dotando a los estudiantes con habilidades sólidas y versátiles que les serán beneficiosas en su futuro académico y profesional, especialmente en campos vinculados a la ciencia, la tecnología y la innovación.

2.5. Metodología

La metodología del curso “Introducción a la Información Cuántica” está diseñada para proporcionar a los estudiantes una experiencia educativa integral que combine teoría, aplicación práctica y participación activa. Las estrategias pedagógicas adoptadas se alinean con el objetivo de facilitar un aprendizaje profundo y significativo en el campo de la información cuántica. A continuación, se detallan las principales metodologías que se implementarán:

1. **Clases Teóricas:** Se llevarán a cabo clases teóricas para presentar y explicar los conceptos fundamentales de la mecánica cuántica y la información cuántica. Estas clases se basarán en la exposición de los principios, teoremas y aplicaciones a través de recursos visuales y ejemplos prácticos.
2. **Laboratorios Prácticos:** Los estudiantes participarán en sesiones de laboratorio donde podrán aplicar los conocimientos adquiridos mediante la experimentación práctica. Se utilizarán simuladores cuánticos y herramientas computacionales para implementar algoritmos cuánticos y explorar fenómenos cuánticos de manera interactiva. Durante las sesiones de laboratorio, los estudiantes tendrán la oportunidad de poner en práctica los conceptos aprendidos con la guía y apoyo directo del profesor de laboratorio y del ayudante del laboratorio. Este complementará las clases con ejemplos computacionales que permitirán a los estudiantes implementar algoritmos cuánticos y explorar fenómenos cuánticos de manera interactiva. Además, se abordarán problemas teóricos que fortalecerán la comprensión profunda de los principios fundamentales de la información cuántica.
3. **Discusiones Dirigidas:** Se promoverán discusiones dirigidas sobre temas específicos de información cuántica. Estas discusiones, guiadas por

preguntas fundamentales, estimularán la participación activa de los estudiantes, fomentando el intercambio de ideas y el desarrollo de habilidades de argumentación científica.

4. **Proyectos Individuales y en Grupo:** Los estudiantes realizarán proyectos individuales y en grupo que involucrarán la aplicación de conceptos aprendidos para abordar problemas específicos. Estos proyectos fomentarán la creatividad, la resolución de problemas y la aplicación práctica de la información cuántica.
5. **Evaluaciones Formativas y Sumativas:** Se implementarán evaluaciones formativas a lo largo del curso para medir el progreso continuo de los estudiantes. Las evaluaciones sumativas, como exámenes y proyectos finales, evaluarán la comprensión integral de los conceptos y la capacidad de aplicarlos.

La combinación de estas metodologías busca crear un entorno de aprendizaje dinámico y participativo que estimule el interés de los estudiantes, promoviendo no solo la adquisición de conocimientos, sino también el desarrollo de habilidades críticas y la capacidad de aplicar la información cuántica en diversos contextos.

2.6. Evaluación

La evaluación en “Introducción a la Información Cuántica” se realizará de manera integral, abarcando diferentes aspectos teóricos y prácticos para medir el progreso y la comprensión de los estudiantes. La distribución de los puntos será la siguiente:

1. **Listas de Ejercicios Teóricos (25 %):** Se asignará un porcentaje del puntaje total a la realización de listas de ejercicios teóricos. Estos ejercicios abordarán los conceptos fundamentales de la mecánica cuántica e información cuántica, permitiendo a los estudiantes aplicar y demostrar su comprensión teórica.
2. **Listas de Ejercicios Computacionales/Proyectos computacionales (25 %):** Se dedicará un porcentaje del puntaje total a la ejecución de listas de ejercicios computacionales. Estos ejercicios proporcionarán a los estudiantes la oportunidad de aplicar sus conocimientos de manera práctica, utilizando herramientas computacionales y simuladores cuánticos para implementar algoritmos y explorar fenómenos cuánticos.
3. **Examen Teórico Final (50 %):** Un examen teórico al final de la disciplina constituirá el componente principal de la evaluación, representando el 50 % del puntaje total. Este examen abarcará los temas discutidos a lo largo del curso, permitiendo a los estudiantes demostrar su comprensión integral de los principios de los fundamentos de la información cuántica.

Esta metodología de evaluación busca proporcionar una evaluación equilibrada que refleje tanto la comprensión teórica como la habilidad práctica de los estudiantes en el campo de la información cuántica. Las listas de ejercicios teóricos y computacionales brindarán oportunidades continuas para la práctica y la retroalimentación, mientras que el examen final permitirá una evaluación más completa de los conocimientos adquiridos a lo largo del curso.

3. CONTENIDOS DEL CURSO

1. **Requisitos previos para estudiar Teoría de la Información Cuántica** - 15/01
 - 1.1. Repaso de Álgebra Lineal
 - 1.2. Propiedades de las Matrices
 - 1.3. Notación de Dirac
 - 1.4. Producto Tensorial
2. **Teoría Clásica de la Información** - 15/01
 - 2.1. Repaso de la teoría de Probabilidades
 - 2.2. Compresión de Datos
 - 2.3. Una Medida de Información: La Entropía de Shannon
 - 2.4. Codificación Clásica y Teorema de Codificación de Shannon
 - 2.5. Capacidad de un Canal Clásico y Teorema de Codificación de Canal de Shannon
 - 2.6. Información Mutua de Shannon y Otras Entropías
 - 2.7. Algunas medidas importantes para la Teoría de Información Clásica
3. **Teoría Cuántica sin Ruido** - Diapositivas - 17/01 mañana.
 - 3.1. ¿Qué es un *qubit*?
 - 3.2. Estados Puros Cuánticos: *Qubits*
 - 3.3. Esfera de Bloch
 - 3.4. Extensiones a Estados de *Qudits*
 - 3.5. Descomposición de Schmidt
 - 3.6. Teorema de No Clonación
4. **Teoría Cuántica con Ruido** - 19/01
 - 4.1. Estados y *ensembles*
 - 4.2. Formalismo de Operadores Densidad
 - 4.3. La bola de Bloch y el estado de 1 *qubit*

- 4.4. Extensiones a Estados Mixtos de *qudits*
- 4.5. El espacio de Matrices Densidad de dos *qubits*
- 5. **Mediciones y Evolución** - 22/01
 - 5.1. Evoluciones Reversibles (Transformaciones Unitarias)
 - 5.2. Las Compuertas Cuánticas
 - 5.3. Mapas Unitarios Mixtos
 - 5.4. Evoluciones Cuánticas: Lindbladianos y Ecuaciones Maestras
 - 5.5. Interpretaciones Físicas de Canales Cuánticos
 - 5.6. Evoluciones Ambientales, Representaciones de Kraus y Choi
 - 5.7. Evoluciones de Desfasamiento y Biestocásticas
 - 5.8. No Markovianidad Cuántica
 - 5.9. Geometría de Operaciones Cuánticas en la bola de Bloch
 - 5.10. Dualidad entre Mapas y Estados
 - 5.11. Mediciones Cuánticas: Proyectores, POVMs (Medida Generalizada de Valores Positivos) y las MUBs
- 6. **Protocolos Cuánticos** Diapositivas 24/01 - mañana
 - 6.1. Protocolo de Codificación Densa Coherente
 - 6.2. Teleportación Cuántica Coherente
- 7. **Entropía Cuántica y Entropía Relativa Cuántica** 24/01 - tarde y 26/01 mañana
 - 7.1. Revisión de Propiedades de Entropías Clásicas
 - 7.2. Mayorización
 - 7.3. Entropía de von Neumann
 - 7.4. Propiedades e Inecuaciones Importantes de las Entropías Cuánticas
 - 7.5. Teorema de la Mixtura de Schrödinger (1936) y sus aplicaciones
 - 7.6. Distancias Entre Estados
 - 7.7. Otras Distancias y Otras Medidas Importantes de la información cuántica: pureza, entropía lineal, fidelidad, etc.
- 8. **Teoría de la Información Cuántica** 26/01 tarde
 - 8.1. Compresión Cuántica de Datos
 - 8.2. Codificación Cuántica y Teorema de Codificación Cuántica
 - 8.3. Capacidad de un Canal Cuántico y Teorema de Codificación de Canal Cuántico
 - 8.4. Información Mutua Cuántica y Otras Entropías Cuánticas

9. **Entrelazamiento** 29/01 y 31/01 clase extra - discusiones en abierto

9.1. Sistemas de 2 partes y la Descomposición de Schmidt

9.2. Codificación Densa y Teleportación

9.3. Medidas de Entrelazamiento

9.3.1. Concordancia

9.3.2. Negatividad

9.3.3. Entrelazamiento de Formación

9.3.4. Entrelazamiento de Estados Mixtos

9.4. Desigualdades de Bell

4. BIBLIOGRAFÍA

Se propone tomar apuntes de clase en español con el objetivo de transformarlos posteriormente en un libro, ya que actualmente hay escaso material de información cuántica disponible en este idioma. Aunque no es exclusivo, la mayoría de los recursos sobre este conocimiento específico se encuentran en inglés y portugués, lo que motiva la necesidad de ampliar el acceso en español.

[1] Wilde, M. (2017). *Quantum Information Theory*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. ISBN: 9781107176164.

[2] Preskill, J. (2011). *Quantum Computation*. Online Lecture Notes.

[3] Nielsen, M., & Chuang, I. (2010). *Quantum Computation and Quantum Information*: 10th Anniversary Edition. Cambridge: Cambridge University Press. doi: ISBN: 9781107002173.

[4] Watrous, J., *The Theory of Quantum Information*. Cambridge: Cambridge University Press, (2018). ISBN: 9781316848142.

[5] Le Bellac, M. (2006). A Short Introduction to Quantum Information and Quantum Computation. Université de Nice, Sophia Antipolis. Cambridge University Press. ISBN: 9780521860567.

[6] Aaronson, S. *Introduction to Quantum Information Science*. Scott Aaronson Blog.

[7] Bengtsson, I., & Życzkowski, K. (2006). *Geometry of Quantum States: An Introduction to Quantum Entanglement*. Cambridge: Cambridge University Press. Online ISBN: 9780511535048.

[8] Parthasarathy, H. (2022). *Classical and Quantum Information Theory for the Physicist* (1st ed.). CRC Press. eBook: ISBN9781003353454.

[9] Schleich, W. P., & Walther, H. (2007). *Elements of Quantum Information*, (1st ed.). Wiley-VCH. ISBN: 9783527611072.

- [10] Petz, D. (2008). *Quantum Information Theory and Quantum Statistics*, (1st ed.). Springer Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-540-74634-8.
- [11] Renes, J. M. (2022). *Quantum Information Theory: Concepts and Methods*. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg. ISBN-13: 978-3110570243.
- [12] Hayashi, M. (2006). *Quantum Information: An Introduction*. (1st ed.). Springer Berlin, Heidelberg. eBook ISBN 978-3-540-30266-7.
- [13] Jaeger, G. (2007). *Quantum Information: An Overview*. Springer New York. ISBN: 387357254.
- [14] Vathsan, R. (2016). Introduction to Quantum Physics and Information Processing. CRC Press, Taylor & Francis Group. BITS Pilani K.K. Birla Goa Campus, India. ISBN: 9780429076398.
- [15] Benenti, G., Casati, G., & Strini, G. (2004). Principles of Quantum Computation and Information Volume I: Basic Concepts. ISBN: 978-981-279-479-6.
- [16] Benenti, G. & Casati, Giulio & Strini, Giuliano. (2007). Principles of Quantum Computation and Information: Volume II: Basic Tools and Special Topics. ISBN: 978-981-256-345-3.
- [17] Barnett, S. (2009). Quantum Information (Oxford Master Series in Physics). Oxford University Press. ISBN: 978-0-19-852762-6.
- [18] Fayngold, M., & Fayngold, V. (2013). Quantum Mechanics and Quantum Information: A Guide through the Quantum World (1st ed.). Wiley-VCH. ISBN: 9783527674725.
- [19] Vedral, V. (2006). Introduction to Quantum Information Science. Oxford University Press. ISBN: 9780199215706.