

Tesis de Doctorado en Enseñanza de las Ciencias Mención Matemática/Física,  
Facultad de Ciencias Exactas, UNICEN. Argentina.

## Enseñanza y aprendizaje de aspectos fundamentales de Física Cuántica en la escuela secundaria colombiana a partir del enfoque de Feynman.

**Autor:** Dra. Keidy Alejandra Alvarado Puentes.

**Directora:** Dra. María de los Ángeles Fanaro.

### Jurados

Dr. Rodrigo Covalada (UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA Colombia)

Dra. Silvia Bravo (UN DE TUCUMÁN Argentina)

Dra. María Paz Gazzola (UNICEN Argentina).

Fecha defensa: 27 de agosto del 2021

### RESUMEN

La enseñanza de la Física en la educación media, según el currículo colombiano (Ministerio de Educación Nacional, 2006), hace referencia a la física clásica dejando fuera las teorías más modernas como las teorías relativista y cuántica; en la escuela media colombiana se debe cubrir el estudio de temáticas muy importantes; pero sin referencia a los conceptos de la física actual como probabilidad, comportamiento de electrones, relatividad. Desde la perspectiva de este trabajo, es necesario que la formación de ciudadanos del mundo les permita entrar en contacto con otros saberes de la física de vanguardia de temas y de teorías en todos sus ámbitos,

Este trabajo de investigación doctoral forma parte de una línea de investigación que propone la Enseñanza de la Mecánica Cuántica a partir del estudio del comportamiento cuántico de los electrones y de la luz en la escuela secundaria. En él se retoma y reformula la Estructura Conceptual Propuesta para Enseñar el comportamiento de los electrones a partir del enfoque *Path Integrals* propuesto originalmente por el Físico Richard Feynman y desarrollado por el equipo de investigación (Fanaro, 2009), en el que se hace una adaptación geométrico vectorial de las integrales de línea al llevarlas a sumas de cantidades vectoriales, técnica matemáticamente accesible al conocimiento de los estudiantes. Este enfoque resulta apropiado para calcular la probabilidad de ocurrencia de distintos eventos con luz o con electrones, he introduce a los estudiantes en la conceptualización de nociones cuánticas fundamentales como probabilidad y superposición.

A partir de las primeras implementaciones desarrolladas en Argentina se rediseña y adapta un conjunto de situaciones,

considerando los obstáculos detectados, por lo que la reformulación didáctica a la secuencia incorpora un conjunto de simulaciones informáticas desarrolladas con plantilla de cálculo que permite a los estudiantes interactuar con las situaciones, en la que se visualizan las variables de la técnica tales como la acción, el ángulo de cada vector asociado a cada camino y la contribución de estos a la suma de todos los vectores asociados a todos los caminos o grupos de caminos; además se presentan los cálculos de las frecuencias relativas de ocurrencia de diferentes eventos.

Dentro del rediseño y adaptación de la secuencia también se proponen dos nuevas situaciones para abordar el obstáculo que se presentó en el cálculo de la probabilidad, como lo son el cálculo de la probabilidad para distintos eventos, una situación con un electrón libre y otra con un electrón como si estuviera en un “billar cuántico” electrón rebote.

Por otra parte, se incluyen dos nuevos eventos acerca del cálculo de la probabilidad para canicas: una para canica libre y otra para una canica en un “billar” (canica rebote), con el objetivo de incentivar a la conceptualización de la transición cuántico - clásica (Principio de correspondencia). Esta reformulación de la secuencia se realizó en forma paralela a su análisis didáctico en el que se preveían y explicitaban las conceptualizaciones que se esperaba que los estudiantes realizaran, es decir, su acercamiento y conceptualización del conocimiento científicamente aceptado.

La secuencia didáctica fue implementada en cuatro cursos de física de un colegio público perteneciente a la Secretaría de Educación del Distrito - Bogotá, durante los años 2016 y 2017, con un total de 118 estudiantes del último nivel de bachillerato.

Los registros se originaron a partir de las respuestas a las situaciones a lo largo de aproximadamente dos meses de encuentros dos veces por semana, en cada uno de los grupos, junto con las grabaciones y una bitácora que se realizó clase a clase, donde se registraron los aspectos principales de cada encuentro: las dificultades, lo esperado, lo inesperado, lo llamativo con relación a todo el acontecer de cada clase. El proceso de categorización de los datos se llevó a cabo a posteriori de la implementación, con base en el marco didáctico adoptado a partir del análisis de las resoluciones realizadas por los estudiantes, utilizando la Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud (1990), proceso del cual se crean seis fases de conceptualización y emergen diecisiete categorías de análisis.

El análisis de la conceptualización se desarrolló por medio de varios estudios, un análisis univariado descriptivo de las categorías emergentes, que permitió hacer un acercamiento descriptivo de los teoremas en acto evidenciados por los estudiantes durante el proceso de conceptualización, además, dio un panorama general de los resultados, dando un parte de viabilidad en el desarrollo de la secuencia pues todos los estudiantes desarrollaron completamente la implementación de la secuencia y no se vieron superados por ella.

Un análisis correlacional (análisis bivariado) para encontrar si había categorías dependientes de a pares, en donde se encontraron trece correlaciones y de ellas, doce resultaron positivas, es decir que entre ellas existe una proporción directa, en dónde; mejores resultados de una categoría conlleva a mejores resultados en la otra y viceversa; siendo la existencia de la mayoría de las correlaciones positivas, un buen indicador de la secuencialidad, el orden y la coherencia de la secuencia implementada.

Un análisis multivariado de correspondencias múltiples para lo cual se tomaron solamente las categorías correspondientes a las fases de la tres a la seis, dado que las primeras dos fases fueron consideradas de predicción, este análisis resalta la influencia de la familiaridad del profesor con la secuencia didáctica como una ayuda para la conceptualización favorable de los estudiantes.

Un análisis textual de las síntesis por el cual podemos decir que los estudiantes utilizan los conceptos científicos objeto de la implementación tales como: experimento - canica - electrón - camino - vector - ángulo - suma - probabilidad - gráfico - máximo; además se encontraron concordancias que dan evidencia de desarrollos en la conceptualización a lo largo de toda la secuencia, como:

- Presentación de las experiencias EDR (canicas, electrones, observación y experimento).
- Uso y aplicación de la técnica de cálculo CCA (camino, directo, vector, ángulo, suma, calcular, probabilidad).
- Interpretación de los resultados de la técnica CCA a las experiencias planteadas en la secuencia (gráfica, máximos).

En general, los resultados permiten concluir que la secuencia resultó viable en la escuela secundaria

colombiana con resultados favorables en la conceptualización de nociones cuánticas, buena parte de los estudiantes reconoce el comportamiento diferente en la Experiencia de la Doble Rendija (EDR) entre los electrones y las canicas; la mayoría de los estudiantes atribuyen este comportamiento diferencial a la discrepancia entre los valores de las masas de estas partículas. Por otra parte, los principales obstáculos detectados en la conceptualización son la manipulación de la técnica de cálculo de probabilidad propuesta para los eventos con canicas y la interpretación del modelo de la función de probabilidad para eventos con canicas.

A partir de los resultados encontrados y a manera de sugerencia para el desarrollo de futuras implementaciones, se reformuló la secuencia enfatizando en el estudio de las variables de la técnica con canicas, a su vez se propone una implementación de la nueva secuencia, pero en un nivel superior de escolaridad con el objeto de analizar si de esta manera se superan los obstáculos detectados frente al modelo de la función de probabilidad, además por el destacado papel del docente que arroja la investigación se propone la creación de una línea de trabajo en la formación de docentes en estos fundamentos.

## REFERENCIAS

Chevallard, Y. (1999). *La Transposición Didáctica. Del saber sabio al Saber enseñado*. Editorial AIQUE.

Fanaro, M., Arlego, M., Otero M. R (2006). Los caminos múltiples de Feynman y la mecánica cuántica en la escuela media Actas del 8 Simposio de Investigación en Educación en Física pág. 161-169. Asociación de Profesores de Física de la Argentina (APFA).

Fanaro, M; Otero, M R; Arlego, M. A (2009). "Teaching the foundations of quantum mechanics in secondary school: a proposed conceptual structure" *Investigações em Ensino de Ciências – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, BRASIL. - ISSN 1518-8795 V14(1), pág. 37-64.*

Fanaro, M. (2009). *La enseñanza de la mecánica cuántica en la Escuela Media (tesis de doctorado)*. Universidad de Burgos, Burgos, España.

Fanaro, M., Otero, M. y Moreira, A. (2009). Teoremas- en acto y conceptos-en acto en dos situaciones relativas a la noción de sistema cuántico. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, 9(3), pág. 1-19.

Fanaro, M., Elgue, M. y Otero, M. (2016). Secuencia para enseñar conceptos acerca de la luz desde el enfoque de Feynman para la mecánica cuántica en la escuela secundaria: un análisis basado en la teoría de los campos conceptuales. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 33(2), pág. 477 - 506.

Feynman, R (1949). [Physical Review](#). Department of Physics, Cornell University, Ithaca, New York. Vol 76.

- Feynman, R (1985). QED The strange theory of light and matter. Penguin Books. Princeton University Press, USA.
- Feynman, R y Hibbs A (1965). Quantum Mechanics and Path Integrals. McGraw-Hill, Inc. USA.
- Greca, I. (2000). ¿Es posible hacer comprensible la mecánica cuántica? Revista de Enseñanza de la Física, 13(2), pág. 13 - 19.
- Hanc, J y Tuleja, S (2005). The Feynman Quantum Mechanics with the help pf Java applets and physlets in Slovakia. En actas del 10<sup>th</sup> Workshop on Multimedia in Physics. Teaching and Learning., Freie Universität Berlin, October 5-7. Berlin. [En línea] Obtenido de [http://pen.physik.uni-kl.de/w\\_jodl/MPTL/MPTL10/contributions/hanc/Hanc-Tuleja.pdf](http://pen.physik.uni-kl.de/w_jodl/MPTL/MPTL10/contributions/hanc/Hanc-Tuleja.pdf)
- López, G. (2014). Enseñanza de la mecánica cuántica en la escuela media a partir del concepto de superposición (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- López-Roldán, P.; Fachelli, S. (2015b). Análisis factorial. En P. López-Roldán y S. Fachelli, Metodología de la Investigación Social Cuantitativa. Bellaterra (Cerdanyola del Vallès): Dipòsit Digital de Documents, Universitat Autònoma de Barcelona. Capítulo III.11. 1a edición.
- Ministerio de Educación República de Colombia (2004). Estándares Básicos de Competencias en Ciencias Naturales y Ciencias Sociales. Series Guiadas N7.
- Ministerio de Educación República de Colombia (2006). Estándares Básicos de Competencias en Lenguajes de Matemáticas, Ciencias y Ciudadanía.
- Moreno y Guarín (2010). Nociones cuánticas en la escuela secundaria: Un estudio de caso. Lat. Am. J. Phys. Educ, 4(3), pág. 669 - 676.
- Monroy, R. (2012). Diseño e implementación de una unidad didáctica para introducir conceptos de mecánica cuántica en estudiantes de bachillerato (tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional, México D. F., México.
- Moreira, M. A. y Greca, I. (2000). Introdução a Mecânica Quântica: seria o caso de evitar a aprendizagem significativa (subordinada)? Em Atas do III Encontro Internacional sobre Aprendizagem Significativa, Peniche, Portugal.
- Moscoloni (2011). Las Nubes de Datos. Métodos para analizar la complejidad. Rosario: UNR Editora.
- Muller, D. (2008). Designing effective multimedia for physics education (tesis doctoral). University of Sydney, Sydney, Australia.
- Otero, M. R. (2006). Emociones, sentimientos y razonamientos en Didáctica de las Ciencias, Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias, 1(1) 24-53 [En línea] Obtenido de [http://www.exa.unicen.edu.ar/reiec/files/ani01/num1/REIEC\\_ani01\\_num1\\_art3.pdf](http://www.exa.unicen.edu.ar/reiec/files/ani01/num1/REIEC_ani01_num1_art3.pdf)
- Otero, M., Fanaro, M. y Arlego, M. (2009). Investigación y desarrollo de propuestas didácticas para la enseñanza de la Física en la Escuela Secundaria: Nociones Cuánticas. Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias, 4(1), pág. 58 - 74.
- Vergnaud, G. (1990). La théorie des champs conceptuels, Recherches en Didactique des Mathématiques. 10 (2/3). La Pensée Sauvage, Marseille.
- Vergnaud, G. (1993). Teoria dos campos conceituais. In Nasser, L. (Ed.) Anais do 1o Seminário Internacional de Educação Matemática do Rio de Janeiro. p. 1-26
- Vergnaud, G. (1994). (coord). Aprendizajes y didácticas: ¿Qué hay de nuevo? Edicial, Buenos Aires. pág. 155.
- Vergnaud, G. (1996). Algunas ideas fundamentales de Piaget en torno a la didáctica, en Revista Perspectivas, Vol. XXVI, No 1.
- Vergnaud, G. (2008). Comunicación personal a la Dra. Rita Otero. Functions, concepts and schemes. A reply to Rita Otero. February 29.
- Vergnaud, G. (2013). Pourquoi la théorie des champs conceptuels? Infancia y Aprendizaje, V 36 2, pág. 131 - 161.