

## Plan de Trabajo

TITULO: Estrategias de control dinámico de sistemas de puntos cuánticos acoplados

Director : Dr. Sergio Santiago Gomez

Instituto de Modelado e Innovación Tecnológica (CONICET-UNNE)  
Corrientes, Argentina.  
[ssgomez@exa.unne.edu.ar](mailto:ssgomez@exa.unne.edu.ar)

### OBJETIVOS

El objetivo central del presente plan se centra en el estudio de diferentes nanodispositivos y técnicas de control dinámico, así como su eventual uso en aplicaciones tecnológicas relacionadas a la Información cuántica. Se trabajará en el marco de la mecánica cuántica y con el formalismo de teoría de respuesta para las propiedades de interés. Como objetivos particulares, de acuerdo con un orden de dificultad y consistente con la formación de posgrado pueden mencionarse

- i) Estudio y caracterización de la estructura electrónica de puntos cuánticos acoplados con dos o más electrones.
- ii) Implementación y análisis de protocolos dinámicos para el control de carga y espín mediante campos electromagnéticos en dichos nanodispositivos.
- iii) Análisis de los efectos de decoherencia en el funcionamiento de los nanodispositivos.

### ANTECEDENTES

El avance en los últimos 20 años en la tecnología de semiconductores ha permitido que podamos confinar una cantidad de electrones controlable en sistemas semiconductores (100nm) [1]. Estas estructuras son consideradas átomos artificiales, dado que los electrones se encuentran ligados debido al potencial de confinamiento de la misma forma que en los átomos reales son atraídos por un potencial central. En el caso de los átomos naturales este potencial es el correspondiente a la atracción Coulombiana del núcleo, mientras que en el caso de los átomos artificiales los electrones son atrapados por pozos de potencial atractivos, que experimentalmente son generados en la interface de aleaciones semiconductoras, y mediante potenciales electrostáticos. Desde un punto de vista teórico el confinamiento puede ser modelado mediante potenciales parabólicos, esféricos, gaussianos, etc. Estos sistemas son considerados en la física experimental como pequeños laboratorios donde se puede estudiar en detalle la mecánica cuántica y los efectos de la interacción electrónica [1]. Los avances en las técnicas experimentales permiten la construcción de puntos cuánticos de diversas formas y características [2-5]. Es posible implementar un sistema de dos

puntos cuanticos acoplados, formando una molécula artificial , en la cual se puede pensar en estados que resemblan los estados de enlace y antienlace que se obtienen en moléculas reales[5]. La primera ventaja evidente que tienen estos sistemas es la capacidad de control que se tiene sobre los parámetros que definen y le dan las características a los mismos[6]. Claramente esto no es posible en los átomos y moléculas reales. Muchas de las propiedades de los átomos artificiales en presencia de campos magnéticos externos han sido estudiadas en forma teórica y experimental en los ultimos años [1,2, 3, 6,7].

Recientemente se ha mostrado un creciente interés en quantum dots dobles acoplados con pocos electrones que interactúan en forma coherente con un campo electromagnético externo, siendo esta una de las posibles implementaciones de un sistema de Bit Cuantico, utilizando por ejemplo los estados Triplete y Singlete de este sistema o bien la ocupacion del cada sitio del doble punto cuantico como el 0 y el 1 del Bit Cuantico. En ambos casos los efectos de decoherencia juegan un papel importante en la degradación, y por lo tanto este efecto debe ser estudiado y caracterizado.

Resulta además de gran interés actual estudiar la localización de uno o varios electrones en uno de los dos pozos bajo la influencia del campo electromagnético externo, la creación de estados maximamente entrelazados, el control del spin total del sistema y la transferencia controlada de los electrones entre ambos pozos [8-11]. Estos sistemas son considerados candidatos prometedores en el campo de la computación cuántica.

En los últimos años dentro de nuestro grupo hemos dedicado gran cantidad de tiempo y esfuerzo en el estudio de Puntos Cuánticos Bidimensionales y sus posibles aplicaciones a tecnologías relacionadas a la Información Cuántica. Hemos realizado el estudio detallado de las propiedades electrónicas y ópticas de puntos cuánticos dobles acoplados (DQDs) en presencia y ausencia de distintas configuraciones de impurezas. Ya mencionamos que los DQDs son candidatos naturales a bits cuánticos. Existen muchos problemas que impiden la implementación eficiente de los mismos en tareas relacionadas con la información cuántica. Además de los problemas más conocidos como la decoherencia, en los semiconductores utilizados para la construcción de estos dispositivos existen impurezas que pueden afectar las propiedades electrónicas y ópticas de los mismos. En nuestro trabajo modelamos dichas impurezas como centros Coulombianos. Logramos estudiar en detalle como las impurezas afectan el entrelazamiento espacial de los dos electrones en el DQD [12]. Hemos logrado identificar cuando una impureza logra destruir cualquier intento por realizar tareas relacionadas con la información cuántica. Recientemente en el grupo de trabajo hemos dedicado tiempo a estudiar el diseño óptimo de los pulsos utilizados para operar los qubits [10,11]. Se logró, mediante la técnica de Optimal Control Theory [13], diseñar pulsos que permiten operar el sistema como un qubit amortiguando los efectos de las impurezas presentes en la muestra [14].

## ACTIVIDADES Y METODOLOGÍA

Durante la implementación del plan de trabajo, el estudiante de doctorado deberá comenzar a desarrollar habilidades y conocimientos relacionados a la resolución de problemas complejos en mecánica cuántica. Se espera que el estudiante sea capaz de analizar, plantear y resolver problemas de muchos cuerpos utilizando diversas técnicas numéricas. Durante los primeros años el estudiante deberá realizar un mínimo de 4 cursos de posgrados. Se espera que al menos dos de estos cursos sean dictados por integrantes del grupo de Nanofísica y estén intimamente relacionados con el tema de trabajo propuesto. Los otros dos cursos pueden ser de temas diversos que ayuden a la formación del doctorando en su futura carrera profesional, tomados en otras instituciones del país o del exterior.

El control de estados de carga y spin en puntos cuánticos de diferentes geometrías resulta un tema de gran interés en aplicaciones tecnológicas relacionadas con la Información Cuántica. Hasta ahora nuestro límite ha sido el control óptimo de un qubit de carga mediante el diseño de un doble punto cuántico con 2 electrones [14]. En el marco del presente plan se pretende estudiar puntos cuánticos contruidos con mas de tres pozos gaussianos con dos o más electrones. Las técnicas para tratar estos problemas estan relacionadas con la metodología empleada en [14,15,16]. El primer sistema que se desea estudiar es un multiple QD diseñado en diferentes geometrías (por ejemplo formando anillos, los cuatro pozos ubicados a lo largo de un círculo). Se pretende estudiar, empleando las técnicas utilizadas en [14], la dinámica de 1 y 2 electrones en dichos sistemas. La aplicación de campos magnéticos y eléctricos permiten controlar la carga o la corriente y el spin de los electrones.

Se espera poder realizar tareas de control de interés en computación cuántica. Un sistema más complejo e interesante es el múltiple QD con 3 electrones [17,18,19]. Este es el sistema más simple que permite controlar los estados de spin empleando solo un campo eléctrico. Para la resolución de este problema debemos emplear métodos similares a los empleados en [15] y [16]. Construiremos un Hamiltoniano many-body (CI) utilizando como one-particle elements los obtenidos utilizando bases gaussianas [14]. Se espera poder implementar protocolos eficientes para la operación del bit cuántico utilizando transiciones entre estados de diferente proyección de spin.

A modo de síntesis, se presenta el siguiente esquema de actividades:

### A. Formativas

1. Elementos de la física cuántica molecular aplicada a sistemas de Quantum Dots con cantidad de electrones arbitrarias.
2. Tecnicas de tratamiento de la correlación electrónica utilizando las diferentes metodologias tales como CI, DFT, HF ,etc.

## B. De Desarrollo

1. Implementación de la dinámica de sistemas de puntos cuánticos con campos electromagnéticos externos, o mediante la variación de parámetros del sistema con potenciales tipo *Gate*.
2. Técnicas de proyección en subespacios de pocos niveles, modelos efectivos. Resolución de hamiltonianos efectivos de los sistemas estudiados.
3. Aplicación de distintos protocolos de control y su utilización para el funcionamiento del sistema como un candidato para almacenamiento de información cuántica.

Para llevar a cabo este plan, en particular el candidato deberá tomar los cursos de posgrado en temas de Densidad Funcional, Diagonalización directa, Método Variacional y diversos métodos numéricos para el estudio de problemas dependiente del tiempo, etc que le permitan obtener una sólida formación en todas las herramientas que necesitará manejar para llevar adelante el trabajo. Se propone que este tipo de cursos se realicen en una etapa temprana, el primer año y medio o dos de beca. Simultáneamente deberá poder cumplir con los temas de investigación que se propone abordar en orden creciente de dificultad, comenzando por la implementación del cálculo de la estructura electrónica en sistemas de interés, así como el estudio de espectro de bajas energías, y la localización de posibles estados que sean utilizados como candidatos a estado binario del Bit Cuántico. Estas actividades se realizarán desde el comienzo mismo de la beca. En una segunda etapa (segundo año) se espera que esté en condiciones de trabajar en la implementación del estudio de dinámica de estos sistemas bajo campos externos variables, y el posterior análisis de los distintos protocolos propuestos para el control de estos sistemas.

## FACTIBILIDAD

El presente plan de trabajo se llevará a cabo en el grupo de Nanofísica del IMIT. En el Instituto se poseen facilidades computacionales adecuadas para la complejidad de los problemas propuestos en este plan. En estos momentos se está terminando de adquirir un cluster de alta performance. Además los investigadores del grupo poseen financiación proveniente de un PIP2015 y un PICT2012 en los cuales están incluidos los temas del presente plan.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] R. C. Ashoori, Nature. 379 , 413 (1996)
- [2] S. M. Reimann y M. Manninen, Rev. Mod. Phys. 74 , 1283 (2002).
- [3] R. Hanson, L. P. Kouwenhoven, J. R. Petta, S. Tarucha y L. M. Vandersypen , Rev. Mod. Phys. 79 , 1217 (2007).
- [4] N. B. Zhitenev, M. Brodsky, R. C. Ashoori, L. N. Pfeiffer y K. W. West, Science. 285 , 715 (1999)

- [5] W. Dybalski y P. Hawrylak, Phys. Rev. B. 72 , 205432 (2005)
- [6 ] J. R. Petta, A. C. Johnson, J. M. Taylor, E. A. Laird, A. Yacoby, M. D. Lukin, C. M. Marcus, M. P. Hanson, A. C. Gossard, Science 309, 2180 (2005)
- [7] R. C. Ashoori, H. L. Stormer, L. M. Pfeiffer, K. W. Baldwin y K. W. West , Phys. Rev. Lett. 71 , 613 (1992).
- [8] L. C. Bassett, F. J. Heremans, D. J. Christle, C. G. Yale, G. Burkard, B. B. Buckley, D. D. Awschalom, Science 345, 1333 (2014)
- [9] L. Childress, et al., Science 314, 281 (2006)
- [10] P. Huang et al, Phys. Rev. X 1, 011003 (2011).
- [11] D. S. Acosta Coden, R. H. Romero and Esa Räsänen, J. Phys.: Condens. Matter 27 115303( 2015).
- [12] D. S. Acosta Coden, R. H. Romero, A. Ferrón and S. S. Gomez, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 46, 065501 (2012).
- [13] J. Werschnik, and E. K. U. Gross, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 40, 175 (2007).
- [14] D. S. Acosta Coden, R. H. Romero, A. Ferrón, S. S. Gomez, [arxiv.org/abs/1603.03718](https://arxiv.org/abs/1603.03718).
- [15] A. Ferrón, F. Delgado, J. Fernández-Rossier, New J. Phys. 17, 033020 (2015).
- [16] A. Ferrón, J. L. Lado, and J. Fernández-Rossier, Phys. Rev. B 92, 174407 (2015)
- [17] Chang-Yu Hsieh, Yun-Pil Shim, Marek Korkusinski and Pawel Hawrylak , Rep. Prog. Phys. 75 (2012) 114501
- [18] Jakub Łuczak and Bogdan R. Bułka Phys Rev B 90, 165427 (2014)
- [19] Matthew P. Wardrop and Andrew C. Doherty, Phys Rev B 93, 075436 (2016).