



Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería de  
Telecomunicación

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de  
Telecomunicación

## Caracterización de ordenadores cuánticos mediante métodos de detección por resonancia magnética

**TRABAJO FIN DE GRADO**

GRADO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE  
TELECOMUNICACIÓN



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

**Autor: Alberto López García**

Director: Dr. Javier Cerrillo Moreno

Cartagena, marzo 2023



# Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi familia por brindarme la oportunidad de llevar a cabo este proyecto y por su apoyo constante en todo momento, especialmente a mi madre, cuyo amor y motivación han sido un gran impulso para mí.

También quiero agradecer a todas aquellas personas que han formado parte de este camino, incluyendo amigos y compañeros que me han brindado su confianza y motivación constante a lo largo del camino.

Por último, pero no menos importante, quiero destacar la labor excepcional de mi tutor, Javier Cerrillo Moreno. Su dedicación y guía han sido fundamentales para el éxito de este trabajo y estoy profundamente agradecido por su compromiso y enseñanza constante.



# Resumen

En este trabajo de investigación se ha estudiado la detección cuántica, un campo que utiliza propiedades cuánticas para medir señales o parámetros físicos, incluyendo señales electromagnéticas. Se han utilizado técnicas de resonancia magnética nuclear (NMR) conocidas como secuencia de Ramsey y Hahn Echo para controlar los transmones de los ordenadores de IBM Quantum y detectar las señales electromagnéticas producidas por la excitación de qubits vecinos.

La secuencia de Ramsey es una técnica de pulsos que mide la frecuencia de un qubit. Consiste en aplicar dos pulsos  $\pi/2$  para preparar y leer el estado cuántico, separados por un tiempo de espera. Esta secuencia se aplica a un qubit sensor. Paralelamente un qubit actuará como señal externa, permitiendo medir la perturbación en la frecuencia del qubit sensor como resultado de la estimulación de los qubits vecinos.

La secuencia Hahn Echo, por su parte, mide el tiempo de coherencia T2 de un qubit. Consiste en aplicar un primer pulso  $\pi/2$  para preparar el estado cuántico del qubit, seguido de un tiempo de espera libre y luego un segundo pulso  $\pi$ . Después de otro tiempo de espera libre, se aplica un tercer pulso  $\pi/2$  para leer el estado del qubit. Esta secuencia se aplica a un qubit sensor. Paralelamente un qubit actuará como señal externa, permitiendo medir la reducción en el parámetro T2 del qubit sensor como resultado de la estimulación de los qubits vecinos.

En este estudio se llevaron a cabo cuatro experimentos para evaluar la sensibilidad de los sensores de detección cuántica a las perturbaciones en la frecuencia del qubit y en el parámetro T2 del qubit sensor. El primer experimento midió la sensibilidad del sensor a las perturbaciones en la frecuencia del qubit mediante la secuencia de Ramsey, mientras que el segundo experimento evaluó la sensibilidad del sensor a las perturbaciones en el parámetro T2 mediante la secuencia Hahn Echo. Para revelar nuevas perturbaciones, se realizó un tercer experimento mediante una modificación del anterior, mostrando oscilaciones en la exponencial esperada de T2. Finalmente, en el cuarto experimento se realizó una modificación respecto al anterior, añadiendo un pulso de rotación variable inicial en el qubit que actúa como señal externa, con el objetivo de observar diferencias dependiendo de su valor. Se presentan dos experimentos adicionales para respaldar la intensidad de la señal. El primer experimento investiga la rotación necesaria para producir la máxima señal, concluyendo que se trata de un pulso  $\pi$ . El segundo experimento analiza la posición que tiene mayor impacto en los resultados, concluyendo que las posiciones inicial e intermedia del qubit que actúa como señal externa son las más relevantes.

Los resultados obtenidos demuestran que las perturbaciones en la frecuencia y el parámetro T2 son indicadores precisos y confiables de la estimulación de los qubits vecinos más próximos al sensor. Para hallar la naturaleza de estas perturbaciones se han realizado diversas técnicas, comenzando por descartar el ruido electrónico como la hipótesis más evidente a priori. Y realizando otra técnica conocida como “Quantum State Tomography”, que nos lleva a verificar que el fenómeno responsable de estas perturbaciones es el entrelazamiento cuántico.

En conclusión, este trabajo de investigación proporciona una metodología para medir señales electromagnéticas con mayor precisión y sensibilidad a través de la detección cuántica. Los resultados obtenidos son prometedores y sugieren que la detección cuántica tiene un gran potencial para ser utilizada en una variedad de aplicaciones en el campo de la medición y detección de señales.



# Abstract

This research work has studied quantum sensing, a field that uses quantum properties to measure physical signals or parameters, including electromagnetic signals. Nuclear magnetic resonance (NMR) techniques known as Ramsey sequence and Hahn Echo have been used to monitor the transmons of IBM Quantum computers and detect electromagnetic signals produced by the excitation of neighboring qubits.

The Ramsey sequence is a pulse technique that measures the frequency of a qubit. It consists of applying two  $\pi/2$  pulses to prepare and read the quantum state, separated by a time delay. This sequence is applied to a sensing qubit. In parallel a qubit will act as an external signal, allowing to measure the perturbation in the frequency of the sensor qubit as a result of the stimulation of neighboring qubits.

The Hahn Echo sequence, on the other hand, measures the coherence time  $T_2$  of a qubit. It consists of applying a first  $\pi/2$  pulse to prepare the quantum state of the qubit, followed by a free timeout and then a second  $\pi/2$  pulse. After another free timeout, a third  $\pi/2$  pulse is applied to read the state of the qubit. This sequence is applied to a sensing qubit. In parallel one qubit will act as an external signal, allowing to measure the reduction in the  $T_2$  parameter of the sensing qubit as a result of the stimulation of neighboring qubits.

In this study, four experiments were conducted to evaluate the sensitivity of quantum detection sensors to perturbations in the qubit frequency and in the  $T_2$  parameter of the sensing qubit. The first experiment measured the sensitivity of the sensor to perturbations in the qubit frequency using the Ramsey sequence, while the second experiment evaluated the sensitivity of the sensor to perturbations in the  $T_2$  parameter using the Hahn Echo sequence. To reveal further perturbations, a third experiment was performed by a modification of the previous one, showing oscillations in the expected exponential of  $T_2$ . Finally, in the fourth experiment a modification of the previous one was performed by adding an initial variable rotation pulse in the qubit acting as an external signal, with the aim of observing differences depending on its value. Two additional experiments are presented to support the signal strength. The first experiment investigates the rotation required to produce the maximum signal, concluding that it is a pulse. The second experiment analyzes the position that has the greatest impact on the results, concluding that the initial and intermediate positions of the qubit acting as the external signal are the most relevant.

The results obtained show that the perturbations in the frequency and the  $T_2$  parameter are accurate and reliable indicators of the stimulation of the neighboring qubits closest to the sensor. To find the nature of these perturbations, several techniques have been used, starting by discarding electronic noise as the most obvious hypothesis initially. And performing another technique known as “Quantum State Tomography”, which leads us to verify that the phenomenon responsible for these perturbations is quantum entanglement.

In conclusion, this research provides a methodology to measure electromagnetic signals with greater precision and sensitivity through quantum detection. The results obtained are promising and suggest that the quantum sensing has great potential to be used in a variety of applications in the field of signal measurement and detection.





# Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
<b>2. CONTEXTO TEÓRICO</b>	<b>7</b>
2.1. El qubit . . . . .	7
2.2. Pulsos y puertas cuánticas . . . . .	9
2.3. Superposición y entrelazamiento . . . . .	10
2.4. Medida . . . . .	10
2.5. Sistemas cuánticos abiertos . . . . .	11
2.6. Pérdida de coherencia en sistemas cuánticos abiertos . . . . .	11
2.6.1. Decaimiento . . . . .	11
2.6.2. Desfase . . . . .	12
2.6.3. Decoherencia . . . . .	13
<b>3. CALIBRACIÓN</b>	<b>15</b>
3.1. Búsqueda de la frecuencia del qubit mediante un barrido en frecuencia . . . . .	15
3.2. Amplitud de driving del qubit mediante oscilaciones de Rabi . . . . .	16
3.3. Discriminador 0vs1 . . . . .	17
3.4. Frecuencia precisa mediante secuencia de Ramsey . . . . .	17
<b>4. EXPERIMENTOS</b>	<b>19</b>
4.1. Experimento 1: Secuencia de pulsos de Ramsey con qubit vecino excitado . . . . .	20
4.2. Experimento 2: Secuencia de pulsos de Hahn Echo con qubit vecino excitado . . . . .	22
4.3. Experimento 3: Secuencia de pulsos de Hahn Echo con pulso simultáneo en qubit vecino . . . . .	24
4.4. Experimento 4: Secuencia de pulsos de Hahn Echo con pulso simultáneo y pulso inicial variable en qubit vecino . . . . .	26
4.5. Justificación de la rotación y posición de los pulsos aplicados en qubit vecino . . . . .	28
4.5.1. Pulso $\pi$ máxima señal . . . . .	28
4.5.2. Alineaciones de pulsos . . . . .	30
<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS: LA CLAVE DEL ENTRELAZAMIENTO</b>	<b>32</b>
5.1. Pureza del sistema cuántico . . . . .	32
5.1.1. Procedimiento . . . . .	32
5.2. Criterio Peres-Horodecki . . . . .	35
<b>6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS</b>	<b>40</b>

# 1. INTRODUCCIÓN

“En la claridad y belleza del cielo de la física clásica, hay dos nubes oscuras”, decía Lord Kelvin, sin ser consciente de que se refería a dos de los mayores avances revolucionarios de la física. Estas dos nubes oscuras hacían referencia a la relatividad y la mecánica cuántica. Esta última, sobre la que nos centraremos, explica el comportamiento de las partículas elementales, las partículas más pequeñas que forman el universo. Estas partículas se comportan de una forma muy contraintuitiva, siendo insuficiente así la explicación de estas mediante la física clásica, debido a algunas de sus propiedades como superposición y entrelazamiento, definidas en su momento por Albert Einstein como “acción fantasmagórica”.

Años más tarde, en la década de 1980, con grandes avances y descubrimientos realizados sobre esta teoría, uno de los físicos más importantes, Richard Feynmann, deseaba relacionar el mundo de la mecánica cuántica con la computación, con el objetivo de poder simular eventos cuánticos, los cuales no eran soportados en los ordenadores clásicos debido a la escalabilidad de la mecánica cuántica. Ahí se creó una nueva rama, la computación cuántica. Gracias a esta, es posible el estudio de fenómenos y propiedades de las partículas, permitiendo nuevos desarrollos y aplicaciones en el campo de la cuántica. De hecho, la posibilidad de tener estas partículas cuánticas a nuestra disposición en un ordenador por medio de qubits, nos ha permitido el desarrollo de los experimentos descritos en este trabajo de investigación.

Por otro lado, tenemos nuestro tema principal, la detección cuántica, basada en el uso de sistemas, fenómenos y propiedades cuánticas para medir una cantidad o magnitud física. Es una rama bastante reciente, en constante crecimiento y con un potencial de aplicaciones en diferentes campos de la ciencia muy grande.

Algunos de los ejemplos que se han desarrollado históricamente son los magnetómetros basados en dispositivos superconductores interferentes, o, los relojes atómicos, aplicados en GPS y con una altísima precisión. Otro ejemplo es la resonancia magnética nuclear (NMR), aplicada por primera vez en 1972, demostrándose que sería capaz de detectar tejidos debido a que cada uno respondería de manera diferente ante un campo magnético. La detección cuántica refleja todo su potencial en la asombrosa precisión y sensibilidad de los dispositivos basados en ella.

El trabajo seguirá una estructura con una primera fase basada en familiarización de conceptos de computación cuántica, tecnología de los qubits y estudio de métodos de detección por resonancia magnética nuclear.

En segundo lugar, calibración de los qubits mediante técnicas de barrido en frecuencia, oscilaciones de Rabi, discriminador 0vs1 y medición precisa de la frecuencia del qubit con la técnica de Ramsey.

Una tercera fase, correspondiente a los experimentos de detección con la aplicación de la técnica de Ramsey con qubits vecinos excitados, técnica de Hahn Echo con qubits vecinos excitados en diferentes alineaciones y otras variaciones basadas en estas técnicas. Además de verificaciones necesarias para hallar la configuración que permita obtener la mayor intensidad de la señal en el qubit vecino que actúa como señal externa.

Y finalmente, análisis de resultados mediante métodos de tomografía cuántica de estados y descripción del origen de las señales detectadas.

El tema de estudio y objetivo final del trabajo puede ser el inicio de un proceso de investigación en la rama de la detección cuántica, para la que dispongo especial motivación en la cantidad de aplicaciones tan interesantes sobre las que se pueden desarrollar estos conocimientos aprendidos. Estamos ante una nueva

vertiente tecnológica donde ramas como la medicina, las comunicaciones y la astronomía pueden verse muy beneficiadas con la aplicación de estos conceptos, permitiendo lograr grandes avances y descubrimientos sobre el mundo que nos rodea, del cual nos queda mucho por averiguar.

## 2. CONTEXTO TEÓRICO

Para una comprensión profunda del tema en cuestión, resulta esencial conocer los aspectos físicos y teóricos que se van a emplear en el desarrollo de los experimentos posteriores. Este conocimiento permitirá una correcta comprensión del objetivo y las conclusiones a las que se lleguen.

### 2.1. El qubit

En primer lugar, ¿qué es un qubit?

Los qubits son la unidad básica de información en la computación cuántica y se rigen por las leyes de la mecánica cuántica. A diferencia de los bits clásicos, que solo pueden tomar valores de 0 o 1, los qubits tienen la capacidad de estar en un estado de superposición, es decir, pueden simultáneamente estar en varios estados a la vez.

La propiedad de superposición es una de las características más interesantes de los qubits, ya que les permite realizar varias operaciones simultáneamente, también conocido como paralelismo cuántico. Sin embargo, es importante tener en cuenta que cuando se mide un qubit en un estado de superposición, solo se puede obtener una de las dos posibles respuestas. En otras palabras, la superposición no se observa explícitamente al realizar una medición, sino que solo se obtiene el resultado final, ya sea  $|0\rangle$  o  $|1\rangle$ , según la base de medición utilizada.

Actualmente existen varios sistemas físicos que se comportan de manera similar a un qubit, tales como el espín de una partícula o el estado de un electrón dentro de un átomo. El estado de un qubit se puede representar matemáticamente como un vector unitario en un espacio de Hilbert, y las operaciones en un qubit se realizan mediante transformaciones unitarias, garantizando así la conservación de la información cuántica frente a pérdidas de esta debido a la naturaleza probabilística de estos sistemas cuánticos.

La notación ket (Ec. 2.1) en mecánica cuántica es una forma eficaz de describir los estados cuánticos de un sistema. Se representa como un vector en un espacio de estados y se escribe como  $|\psi\rangle$ . Esta notación permite representar un estado cuántico en términos de su combinación lineal de estados base y sus respectivos coeficientes complejos, que indican la amplitud de probabilidad de obtener al sistema en ese estado. El valor absoluto de la amplitud de probabilidad al cuadrado proporciona la probabilidad de hallar el sistema en ese estado.

El qubit es un sistema cuántico que se puede representar por un ket, que es la combinación lineal de dos estados base,  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$ . Por lo tanto, lo podemos escribir como:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle. \quad (2.1)$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son dos coeficientes complejos. Estos coeficientes indican la amplitud de probabilidad de obtener como resultado al qubit en cada uno de los estados base. La condición de normalización  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$  garantiza que la probabilidad total sea 1. En otras palabras,  $|\alpha|^2$  representa la probabilidad de que el qubit colapse al estado  $|0\rangle$  y  $|\beta|^2$  representa la probabilidad de que colapse en el estado  $|1\rangle$ . En resumen, la notación de un qubit permite describir y representar el comportamiento probabilístico de un sistema cuántico de dos niveles.

Como consecuencia de ello, el estado de un qubit puede ser representado mediante una parametrización matemática (2.2), que nos permite visualizarlo como un vector en la esfera de Bloch, una herramienta geométrica que nos proporciona una representación tridimensional de los estados cuánticos. Cada punto en la esfera representa un estado posible del sistema de dos niveles. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de la esfera de Bloch y su relación con el estado cuántico de un qubit. La esfera de Bloch es fundamental para la comprensión de los estados cuánticos y resulta muy útil para la visualización de su comportamiento.

$$|\psi\rangle = \cos(\theta/2)|0\rangle + \sin(\theta/2)e^{i\varphi}|1\rangle. \quad (2.2)$$

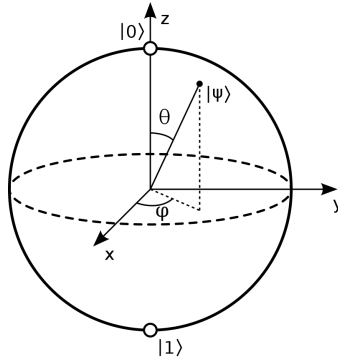


Figura 1: Imagen de la esfera de Bloch utilizada para la visualización y representación geométrica de los estados cuánticos de un qubit. El “polo norte” de la esfera representa el estado base  $|0\rangle$ , el “polo sur” el estado base  $|1\rangle$  y el resto una combinación lineal de ambos estados, donde  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$  y  $0 \leq \theta \leq \pi$ . [9]

El “polo norte” de dicha esfera representa el estado base  $|0\rangle$ , el “polo sur” el estado base  $|1\rangle$  y cada punto de la superficie representa un estado posible del qubit, siendo la dirección del vector unitario en cada punto la proporción de los estados base  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$  que componen dicho estado.

La transición entre los estados base puede ser definida mediante la energía de transición (Fig. 2),  $E = \hbar\omega_0$ , donde  $\hbar$  es la constante de Planck y  $\omega_0$  es la frecuencia de la transición. Dicha energía representa a la diferencia de energía entre los dos estados cuánticos. Esta energía podrá ser manipulada para cambiar el estado cuántico del qubit mediante la aplicación de radiación con dicha frecuencia  $\omega_0$ .

Tal y como veremos en capítulos posteriores, nuestro principal fundamento de detección cuántica sobre el que se basan los experimentos tratados en este trabajo, es la perturbación de la diferencia de energía entre los estados. Este hecho, conocido como efecto Zeeman, permite detectar la presencia de campos magnéticos externos y su influencia sobre los estados cuánticos, impactando en la inestabilidad y coherencia de estos.

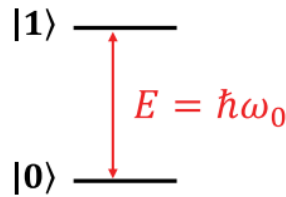


Figura 2: Representación de la diferencia de energía entre el nivel de energía inferior o estado base  $|0\rangle$  y el nivel de energía superior o estado base  $|1\rangle$ , definida como el producto de la constante de planck ( $\hbar$ ) por la frecuencia de transición ( $\omega_0$ ). [3]

## 2.2. Pulsos y puertas cuánticas

Los estados cuánticos presentados en el apartado anterior serán manipulados y controlados a través de pulsos electromagnéticos con forma gaussiana.

Un pulso gaussiano (Fig. 3) es un tipo de pulso que sigue una función gaussiana, es decir, una curva envolvente en forma de campana. La forma matemática de un pulso gaussiano se puede describir como  $f(t) = A \cos(\omega t + \phi) e^{-x^2/\sigma}$ , donde  $A$  es la amplitud,  $\omega$  es la frecuencia de oscilación del pulso,  $\phi$  es la fase, y  $\sigma$  es el ancho del pulso. Otro parámetro importante sería la duración, cuya función es truncar la duración de la gaussiana ya que esta no tiene longitud finita natural. Estos parámetros controlan la forma y la intensidad del pulso.

Los pulsos cuánticos pueden ser utilizados para generar puertas cuánticas ajustando sus parámetros. Por ejemplo, ajustando la amplitud, la frecuencia y la fase de los pulsos, se pueden generar puertas cuánticas específicas, como puertas  $\pi/2$ ,  $\pi$  u otras rotaciones.

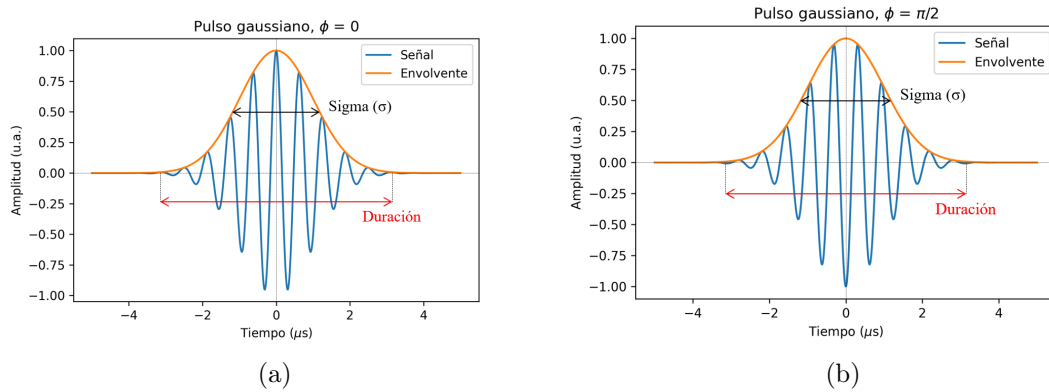


Figura 3: Representación del pulso gaussiano cuántico para la manipulación y el control de los qubits, donde se muestran los diferentes parámetros de ajuste como la amplitud ( $A$ ), la frecuencia ( $\omega$ ) y la fase ( $\phi$ ) ((a):  $\phi = 0$ , rotación en eje X; (b):  $\phi = \pi/2$ , rotación en eje Y). Además de sigma ( $\sigma$ ) y la duración truncada debido a que la gaussiana no tiene longitud finita natural.

Estos tipos de puertas cuánticas son esenciales en la implementación de las secuencias para el desarrollo de los experimentos tratados, permitiendo controlar la evolución de los estados cuánticos.

Se puede entender que una puerta cuántica es una rotación en la esfera de Bloch (Fig. 1), lo que proporciona una representación geométrica del efecto de estas operaciones en los estados cuánticos y se corresponde con una operación unitaria en el espacio de estados cuánticos. La visualización intuitiva de la evolución de los estados y su relación con los pulsos y puertas cuánticas se vuelven posibles gracias a esta interpretación.

Los estados cuánticos se pueden expresar como vectores (Ec. 2.3) y las transformaciones unitarias, es decir, las puertas cuánticas se pueden expresar como matrices. Por lo tanto, la aplicación de estas a un estado cuántico se puede interpretar como una multiplicación de una matriz por un vector, resultando como  $|\psi'\rangle = X|\psi\rangle$ . A ese conjunto de matrices reflejado en la ecuación 2.4 se le denomina matrices de Pauli.

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

$$X \equiv \sigma_x \equiv \sigma_1 \equiv \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad Y \equiv \sigma_y \equiv \sigma_2 \equiv \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad Z \equiv \sigma_z \equiv \sigma_3 \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (2.4)$$

## 2.3. Superposición y entrelazamiento

Tal y como mencionamos en apartados anteriores (Sec. 2.1), la superposición es un concepto clave de la mecánica cuántica que describe como un sistema puede estar en múltiples estados simultáneamente, entendiéndose como una combinación lineal de los posibles estados de dicho sistema, descrita por la ecuación 2.1.

La aplicación de un pulso específico con una rotación de  $\pi/2$  (Sec. 2.2) en los estados  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$  del sistema coloca el qubit en un estado de superposición. Los estados de superposición resultantes dependerán del estado cuántico en el que se encuentre y de si el pulso  $\pi/2$  se aplica en el eje X (Ec. 2.5) o en el eje Y con su correspondiente fase (Ec. 2.6).

$$|0\rangle \xrightarrow{X, \pi/2} |\psi'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \quad |1\rangle \xrightarrow{X, \pi/2} |\psi'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \quad (2.5)$$

$$|0\rangle \xrightarrow{Y, \pi/2} |\psi'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + i|1\rangle) \quad |1\rangle \xrightarrow{Y, \pi/2} |\psi'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - i|1\rangle) \quad (2.6)$$

Por otro lado, el entrelazamiento cuántico, otro fenómeno clave de la mecánica cuántica, describe la conexión fuerte y no local entre dos o más partículas. El entrelazamiento se produce cuando dos sistemas comparten un estado cuántico común no separable (Ec. 2.7), lo que significa que la información sobre el estado de una partícula se refleja inmediatamente en el estado de la otra. En el estado, la primera partícula se denota como “A” y la segunda como “B”. Esto se puede ver como una correlación fuerte entre los estados cuánticos de los sistemas, que persiste incluso si estas se separan a grandes distancias.

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A |0\rangle_B + |1\rangle_A |1\rangle_B). \quad (2.7)$$

## 2.4. Medida

La medida es un concepto fundamental en la teoría cuántica y se refiere a la forma en que se obtiene información sobre un sistema cuántico. En términos generales, la medida implica la observación de un qubit, lo que resulta en el colapso de su estado hacia uno de los estados base del eje de medición. La probabilidad asociada a cada estado base depende de los coeficientes complejos asociados a cada estado del qubit.

En la mecánica cuántica, es posible medir el estado de un sistema en cualquier eje deseado. Los ejes principales son X, Y y Z, y cada uno de ellos corresponde a una base de medición diferente. Al medir en la base Z, simplemente se realiza una medición del estado del qubit. Por otro lado, al medir en las bases X o Y, se aplica un pulso  $\pi/2$  X o Y, respectivamente, antes de la medición, tal y como se refleja en las ecuaciones 2.5 y 2.6.

Es importante tener en cuenta que una vez que se mide un qubit en un eje, el sistema experimenta un colapso y se encuentra en un estado definido en ese eje. Si se intenta medir el estado del qubit en otro eje, el sistema se encontrará en una superposición uniforme de dos estados diferentes. En otras palabras, al obtener una definición en un eje, se pierde información en los otros ejes.

Además, es crucial tener en cuenta que el orden en que se realizan las mediciones en el mundo cuántico es importante y puede afectar los resultados finales. Por lo tanto, la elección de la base de medición y el orden de las mediciones son decisiones importantes que deben tomarse cuidadosamente.

Es importante mencionar que la medida cuántica es un proceso no determinista, lo que significa que no se puede predecir con certeza a qué estado colapsará el sistema. Sin embargo, es posible predecir la probabilidad de que un estado específico colapse. Esta propiedad esencial de la teoría cuántica se conoce como incertidumbre cuántica y es una de las principales diferencias entre la física clásica y la física cuántica.

## 2.5. Sistemas cuánticos abiertos

Los sistemas cuánticos abiertos son aquellos que están en constante interacción con su entorno. Esta interacción puede tener un impacto significativo en el comportamiento del sistema cuántico.

Tal y como se detalla en apartados anteriores (Sec. 2.1), en la teoría cuántica, los estados de los sistemas se representan mediante un vector de Bloch, el cual describe el estado probabilístico del sistema. Sin embargo, en un sistema cuántico abierto, la interacción con el entorno puede causar una pérdida de coherencia en el sistema, reflejándose directamente en el vector de Bloch.

Esta pérdida de coherencia se produce debido a la naturaleza probabilística de la teoría cuántica y a la “media” de los resultados de muchos experimentos. Como resultado, el vector de Bloch puede estar ubicado en el interior de la esfera de Bloch en lugar de en su superficie. En definitiva, estos estados, conocidos como “estados mezcla”, se caracterizan por tener un módulo del vector de Bloch menor que 1.

## 2.6. Pérdida de coherencia en sistemas cuánticos abiertos

La coherencia es un aspecto fundamental de la mecánica cuántica y se refiere a la capacidad que tiene un sistema cuántico de mantener estados en superposición. En el contexto tratado, la pérdida de coherencia se produce cuando la interacción con el entorno destruye la correlación entre los estados cuánticos, provocando que la superposición de estados desaparezca. Esto se traduce en una reducción del vector de Bloch que representa el estado cuántico del sistema. Esta pérdida de coherencia limita la capacidad de los sistemas para la realización de los diferentes experimentos tratados debido al reducido tiempo de vida útil de estos (decenas de microsegundos), destruyendo consigo las propiedades cuánticas de los sistemas.

### 2.6.1. Decaimiento

El decaimiento es un proceso importante en la física cuántica que está relacionado con la pérdida de coherencia en los sistemas cuánticos. Se produce cuando la energía del qubit se relaja desde su estado excitado  $|1\rangle$  al estado fundamental  $|0\rangle$ , eliminando cualquier coherencia entre ambos estados. Este proceso de decaimiento se describe mediante el parámetro temporal  $T_1$  o tiempo de relajación.

La medición del tiempo de relajación  $T_1$  se realiza mediante una secuencia llamada “Inversion Recovery”, que consiste en excitar el qubit para situarlo en su estado excitado  $|1\rangle$ , seguido de un período de tiempo en el que se deja que el sistema evolucione libremente (llamado “delay”) antes de realizar la medición. El resultado de la medición es una exponencial decreciente, donde la probabilidad de medir el estado  $|1\rangle$  disminuye exponencialmente con el tiempo. Específicamente, la probabilidad de medir el estado  $|1\rangle$  en función del tiempo  $t$  está dada por la ecuación  $P(|1\rangle, t) = e^{-t/T_1}$ .



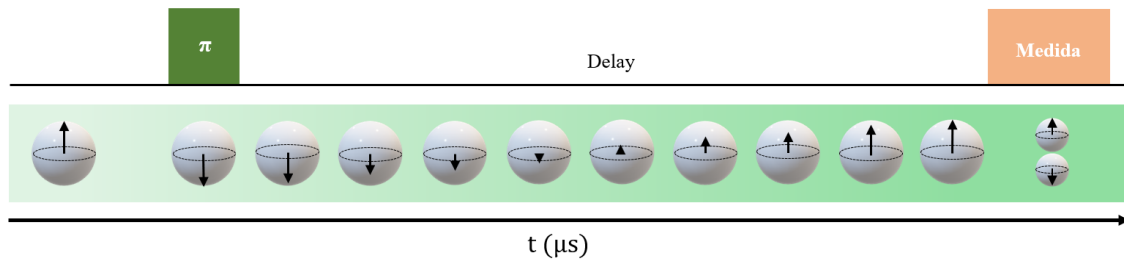


Figura 4: Representación de la secuencia “Inversion Recovery” para la medición del parámetro temporal de relajación  $T_1$ , donde se aprecia inicialmente al qubit en el estado base  $|0\rangle$ , seguido de un pulso  $\pi$  que sitúa al qubit en el estado  $|1\rangle$ , de mayor energía. Posteriormente se deja al sistema evolucionar libremente por una duración de tiempo que denominamos “delay” y finalmente el proceso de medición del estado cuántico, que colapsará a un estado u otro dependiendo de las probabilidades asociadas. Este proceso se repite muchas veces para distintos valores de “delay”. En la parte inferior de la figura se muestra el proceso natural que seguiría el vector de Bloch del qubit estudiado. [5]

### 2.6.2. Desfase

El desfase cuántico es un fenómeno que ocurre cuando los estados cuánticos pierden coherencia y cohesión. Se determina a través del parámetro temporal  $T_2^*$  o tiempo de desfase (Fig. 9b), que se mide con la secuencia de Ramsey (Fig. 5). Esta técnica consiste en aplicar un primer pulso  $\pi/2$  para preparar el qubit en un estado de superposición, seguido de un tiempo de espera libre y, finalmente, un segundo pulso  $\pi/2$  para colocar al sistema en la base. Cuando el qubit está en un estado de superposición, su vector de estado empieza a rotar alrededor del ecuador de la esfera de Bloch, denominando a este proceso como precesión.

El desfase se debe a que los vectores medidos en distintas ejecuciones tienen velocidades de rotación o frecuencias de precesión ligeramente diferentes. Al promediar un número de mediciones de un mismo punto, el vector resultante sufre un acortamiento debido a la variabilidad en las velocidades. Cuanto mayor sea el desfase temporal entre los vectores medidos, mayor será el acortamiento del vector resultante (Fig. 6).

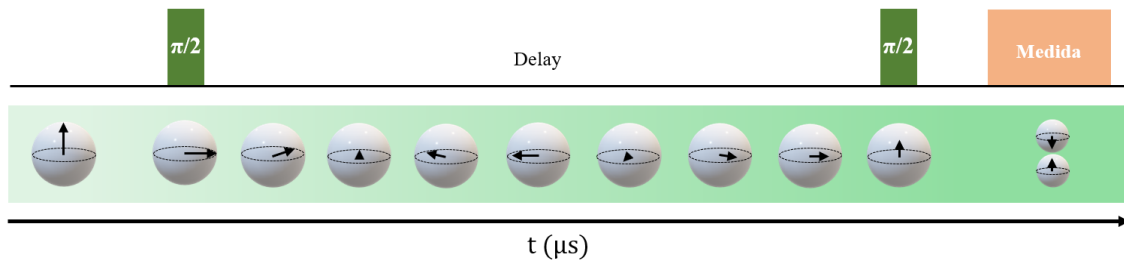


Figura 5: Representación de la secuencia de “Ramsey” para la medición del parámetro temporal de desfase  $T_2^*$ , donde se aprecia inicialmente al qubit en el estado base  $|0\rangle$ , seguido de un pulso  $\pi/2$  que sitúa al qubit en el estado de superposición. Posteriormente se deja al sistema evolucionar libremente por una duración de tiempo que denominamos “delay” donde el vector de Bloch comienza a rotar alrededor del ecuador de la esfera. Además se visualiza como dicho vector a medida que avanza va sufriendo un acortamiento debido al promedio de las diferentes ejecuciones para cada punto de medición. En siguiente lugar, se vuelve a aplicar un pulso  $\pi/2$ , para colocar al sistema en la base de medición. Y finalmente se realiza la medida del estado, que colapsará a uno u otro dependiendo de las probabilidades asociadas. Este proceso se repite muchas veces para distintos valores de “delay”. [6]

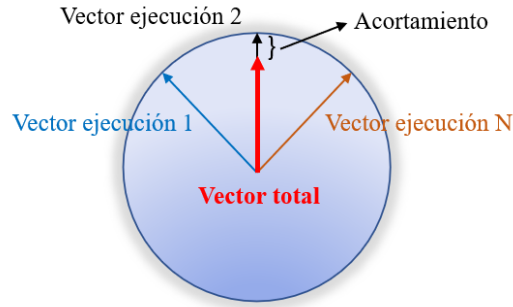


Figura 6: Representación en la esfera de Bloch desde un plano cenital, para mejor apreciación del ecuador de esta, del acortamiento total de un experimento o medición debido a la variabilidad de las velocidades de rotación de los vectores de las distintas ejecuciones realizadas. En el ejemplo que se puede visualizar se detallan 3 vectores (azul, negro, naranja), para una mayor claridad del concepto tratado, resultando el vector total (rojo) acortado.

### 2.6.3. Decoherencia

La decoherencia es un proceso físico que ocurre en los sistemas cuánticos, por el cual dicho sistema pierde su coherencia, haciendo que se vuelva más clásico. La coherencia permite a los sistemas mantener sus propiedades, como superposiciones y correlaciones cuánticas. El parámetro que cuantifica este proceso es T2 o tiempo de decoherencia (Fig. 9c), cuya medición se realiza mediante la secuencia Hahn Echo (Fig. 37). La pérdida de coherencia viene reflejada por  $S(t) = e^{-t/T^2}$ , donde “S(t)” representa la amplitud de la señal en un momento dado “t”, mientras que “T2” representa el tiempo de coherencia del sistema.

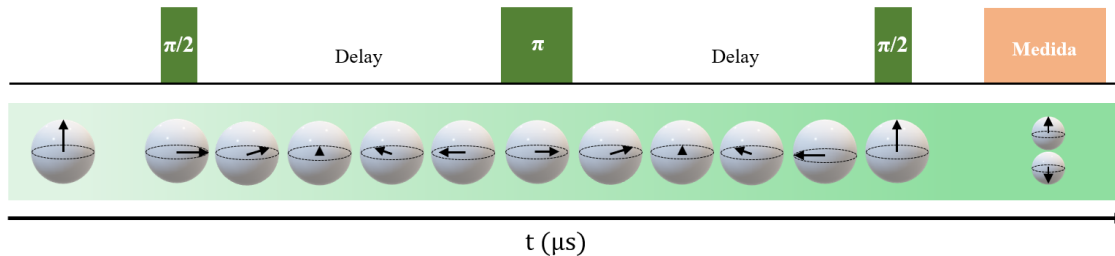


Figura 7: Representación de la secuencia Hahn Echo para la medición del parámetro temporal de decoherencia T2, donde se aprecia inicialmente al qubit en el estado base  $|0\rangle$ , seguido de un pulso  $\pi/2$  que sitúa al qubit en el estado de superposición. Posteriormente, se deja al sistema evolucionar libremente donde el vector de Bloch comienza a rotar alrededor del ecuador de la esfera. Además se visualiza como dicho vector a medida que avanza va sufriendo un acortamiento del vector total, debido al desfase de los distintos vectores de las diferentes ejecuciones del punto de medición del experimento. A continuación, se aplica un pulso  $\pi$  que revierte el desplazamiento natural de los vectores mencionados anteriormente compensando dicho desfase, consiguiendo que el vector vuelva a su posición tras un tiempo de espera libre y se produzca el “echo”. Por último, aplicamos un pulso  $\pi/2$  para colocar al sistema en la base de medición. Y finalmente se realiza la medida del estado, que colapsará a uno u otro dependiendo de las probabilidades asociadas. Este proceso se repite muchas veces para distintos valores de “delay”. [7]

La secuencia Hahn Echo cancela el ruido de desfase en sistemas cuánticos mediante la aplicación de una serie de pulsos. Comenzando con un pulso  $\pi/2$  para preparar el estado de superposición, se permite

que el sistema evolucione antes de aplicar un pulso  $\pi$  que revierte el desfaseamiento. Este ruido se produce por la diferencia de velocidades de rotación de los vectores en cada ejecución del experimento, lo que acorta el vector total del sistema. La secuencia Hahn Echo compensa este desfaseamiento mediante la aplicación del pulso  $\pi$ , deshaciendo esa precesión a distintas velocidades para recuperar la señal. Tras otro tiempo de evolución libre, se vuelve a aplicar un pulso  $\pi/2$  con el objetivo de colocar al sistema en la base de medición deseada.

Para entender mejor esta técnica, se puede hacer una analogía con una carrera de atletismo. Imaginemos que dos atletas parten desde la línea de salida con velocidades diferentes pero constantes. Después de un tiempo de espera (delay), se les da la señal para dar la vuelta (pulso  $\pi$ ). A pesar de que el corredor más rápido puede tomar una ventaja inicial, tras esperar el mismo tiempo nuevamente, ambos corredores regresarán a la línea de salida en la misma posición al mismo tiempo, anulando cualquier ventaja (desfase de los vectores) que el corredor más rápido pudiera haber tenido.

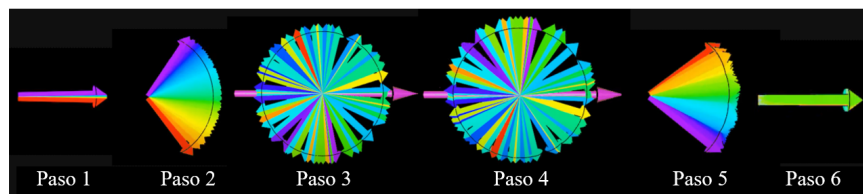


Figura 8: Representación del proceso de compensación de desfases. Encontramos un primer paso donde el vector tiene total coherencia, sin desfases. En segundo lugar, observamos como los vectores comienzan a desfasarse perdiendo coherencia. A continuación, observamos desfaseamiento total de los vectores. En cuarto lugar, la aplicación del pulso de rotación  $\pi$  (observar referencia del vector rojo). Posteriormente, observamos como los vectores comienzan a recuperar su coherencia tras el proceso de compensación. Y finalmente, la coherencia total de los vectores, de nuevo sin desfases, consiguiendo así el “spin-echo”. [8]

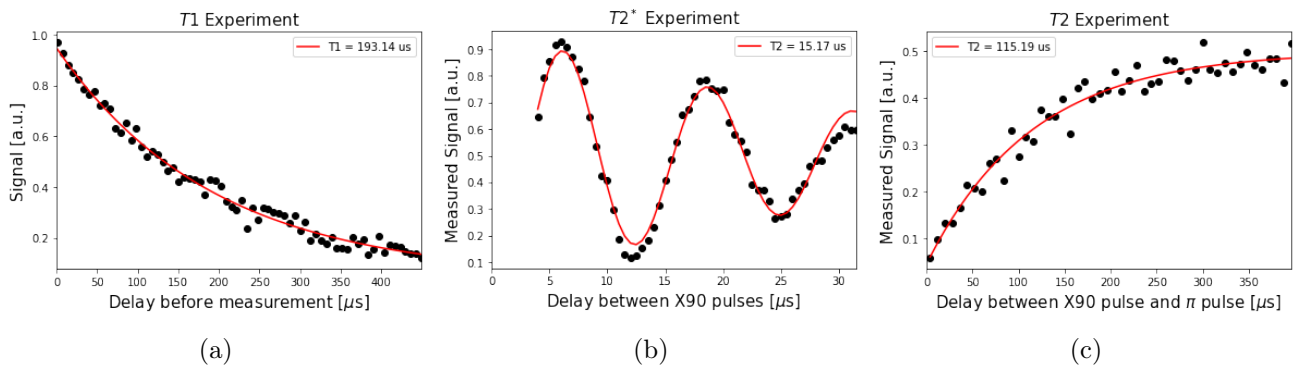


Figura 9: Representación del experimento de medición de los parámetros temporales  $T_1$ ,  $T_2^*$  y  $T_2$ . Los puntos negros de las gráficas hacen referencia al punto de medición detectado, mientras que la línea roja representa el ajuste de la tendencia por mínimos cuadrados de los resultados del experimento. El eje Y marca la señal mediante unidades arbitrarias y el eje X, el retardo entre pulsos de las distintas secuencias. (a) “Inversion Recovery”. Observamos la caída exponencial de la señal en la medición del parámetro  $T_1$  mediante la función  $P(|1\rangle, t) = e^{-t/T_1}$ , debido a la relajación de energía del qubit, pasando del estado  $|1\rangle$  al estado fundamental  $|0\rangle$ . (b) “Ramsey”. Observamos las oscilaciones producidas en la medición de  $T_2^*$  por la rotación del vector a lo largo del ecuador de la esfera, además de la reducción de la señal producida por el acortamiento del vector total. (c) “Hahn Echo”. Observamos el comportamiento exponencial de la señal en la medición del parámetro  $T_2$  mediante la función  $S(t) = e^{-t/T_2}$ .

# 3. CALIBRACIÓN

La calibración [2] del qubit es una fase crucial para la realización de experimentos precisos y fiables. En nuestro caso, la calibración se divide en cuatro fases principales: la búsqueda de la frecuencia del qubit, la determinación de la amplitud del driving del qubit, el discriminador  $0vs1$  y la frecuencia precisa mediante la secuencia de Ramsey. Estas etapas permiten identificar la frecuencia característica del qubit, ajustar la amplitud del pulso con precisión, determinar el estado del qubit de manera clara y precisa y ajustar la frecuencia del pulso con una precisión extremadamente alta.

## 3.1. Búsqueda de la frecuencia del qubit mediante un barrido en frecuencia

La frecuencia de un qubit se define como la diferencia de energía entre los estados cuánticos  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$  dividida por la constante de Planck (Fig. 2). La medición de la frecuencia de un qubit es esencial en la caracterización y el control de un sistema cuántico.

Para medir la frecuencia de un qubit, se lleva a cabo un barrido de frecuencia en torno a la frecuencia central de 5 GHz, que es la frecuencia de operación de los qubits en nuestro ordenador cuántico. El barrido de frecuencia consiste en variar la frecuencia aplicada al qubit y registrar la respuesta del sistema. La representación gráfica del barrido revela un pico de señal que corresponde a la frecuencia del qubit en cuestión, como se muestra en la Figura 10. En este caso, la frecuencia obtenida para el qubit 0 es de  $f \cong 4.962$  GHz.

Es importante destacar que, aunque este método de barrido de frecuencia no es extremadamente preciso, brinda una orientación útil para la aplicación de técnicas más precisas y exhaustivas en el futuro. Con una medición precisa de la frecuencia de un qubit, es posible controlar y optimizar su comportamiento en un sistema cuántico complejo.

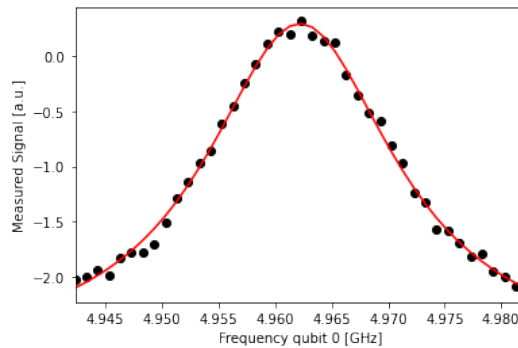


Figura 10: Representación del resultado de búsqueda de la frecuencia del qubit mediante un barrido en frecuencia. En el eje de ordenadas (eje y) se representa la señal medida en unidades arbitrarias mientras que en el eje de abscisas (eje x) se representa el rango de frecuencias del barrido. Los puntos negros hacen referencia a una medición de la señal y la línea roja representa el ajuste de la tendencia por mínimos cuadrados de los resultados del experimento. El resultado proporciona el pico de frecuencia correspondiente a la frecuencia del qubit estudiado, qubit 0, determinándose en torno a los  $f \cong 4.962$  GHz.

### 3.2. Amplitud de driving del qubit mediante oscilaciones de Rabi

Una vez determinada la frecuencia característica de un qubit, el siguiente paso es establecer la intensidad necesaria para lograr la manipulación deseada. En términos cuánticos, el pulso de control se refiere a una operación que permite la transición entre los estados base del qubit, específicamente, desde  $|0\rangle$  a  $|1\rangle$ , y viceversa. El pulso  $\pi$  o puerta X es el término técnico utilizado para describir este proceso.

La frecuencia de microondas necesaria para llevar a cabo esta transición ha sido previamente identificada a través de un experimento de barrido de frecuencias, y en este momento nos enfocaremos en determinar la amplitud adecuada para lograr una rotación  $\pi$  en el qubit.

Para ello, variaremos la amplitud del pulso de manera incremental y mediremos el estado del qubit en cada paso. Se espera observar oscilaciones conocidas como oscilaciones de Rabi, en las que el qubit pasa alternadamente entre los estados  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$  (Fig. 11).

Los resultados obtenidos se analizarán y ajustarán a una curva sinusoidal. En el rango de amplitudes seleccionado, esperamos que el qubit haya sido rotado varias veces completamente alrededor de la esfera de Bloch, partiendo desde el estado  $|0\rangle$ . La amplitud de la forma sinusoidal nos dice cuántas mediciones dieron como resultado el estado  $|1\rangle$  a esa amplitud de pulso de Rabi.

El objetivo final es encontrar la amplitud necesaria para que la señal oscile desde un máximo (estado  $|1\rangle$ ) hasta un mínimo (estado  $|0\rangle$ ), lo que nos permitirá calibrar la amplitud adecuada para lograr un pulso  $\pi$  o X con precisión. En este caso concreto, dicha amplitud medida para el qubit 0 es de  $A \cong 0.095$  u.a..

Como mencionaba, con la amplitud obtenida, podemos construir pulsos de rotación deseados, específicamente, un pulso  $\pi$  o X tendrá la amplitud completa mientras que un pulso de  $\pi/2$  o  $90^\circ$  tendrá una amplitud reducida de  $A/2$ .

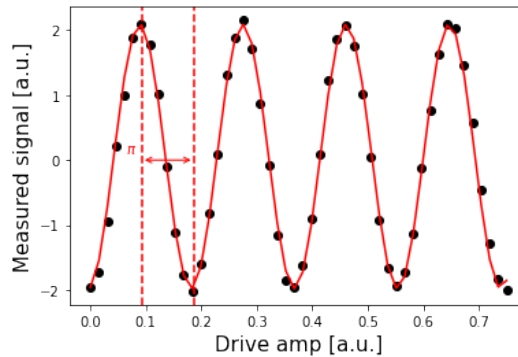


Figura 11: Representación del resultado de medición de amplitud de driving del qubit mediante oscilaciones de Rabi. En el eje de ordenadas (eje y) se representa la señal medida en unidades arbitrarias y en el eje de abscisas (eje x) se representa la amplitud de driving en unidades arbitrarias también. Los puntos negros hacen referencia a una medición de la señal y la línea roja representa el ajuste de la tendencia por mínimos cuadrados de las oscilaciones entre transiciones de los estados  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$ . El resultado nos proporciona el valor de amplitud correspondiente a un pulso  $\pi$  del qubit estudiado, qubit 0, determinándose en torno a los  $A \cong 0.095$  u.a..

### 3.3. Discriminador 0vs1

La calibración del discriminador es un proceso clave para garantizar la precisión de nuestras mediciones en el mundo cuántico. Consiste en la preparación de dos estados distintos,  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$ , y en la realización de múltiples mediciones. Al hacer una medición, el clasificador determina si el estado está más cerca de 0 o de 1 y lo clasifica con precisión.

Para calibrar el discriminador, preparamos y medimos repetidamente los estados  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$ . Los resultados se representan en forma de nube de valores (Fig. 12), lo que nos permite ver claramente la diferencia entre ambos estados. La tarea del clasificador es encontrar la manera óptima de separar estos dos grupos de valores medidos.

La calibración adecuada del discriminador es esencial para obtener medidas precisas y confiables en el mundo cuántico. Con una calibración eficaz, podemos determinar con precisión si un estado se encuentra más cerca de 0 o de 1.

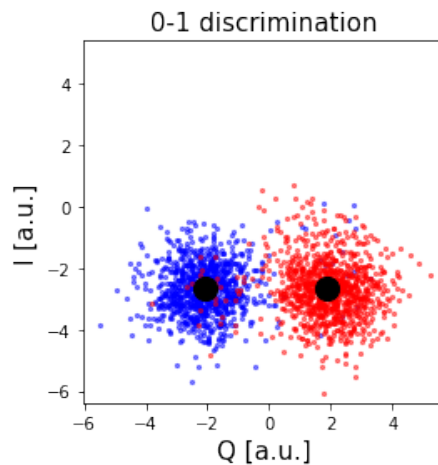


Figura 12: Representación del resultado de discriminación de los estados  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$  para la obtención del clasificador de mediciones. El eje “I” (En fase) y “Q” (Cuadratura) representan los componentes de una representación matemática llamada representación en el plano IQ. El eje I representa la componente en fase con la frecuencia de referencia y el eje Q representa la componente fuera de fase con la frecuencia de referencia. Combinados permiten representar la señal compleja en una gráfica para facilitar su análisis. Los dos puntos negros representan la referencia de los estados, sobre los que se mide la proximidad de las mediciones y su posterior clasificación. Los puntos azules y rojos representan las mediciones clasificadas en un estado u otro.

### 3.4. Frecuencia precisa mediante secuencia de Ramsey

En la calibración de un qubit, es fundamental determinar con alta precisión su frecuencia resonante. Para ello, se utiliza la secuencia de pulsos de Ramsey, una técnica que permite medir la diferencia de frecuencia entre la frecuencia del pulso aplicado y la frecuencia real del qubit.

Como se ha explicado en apartados anteriores (Sec. 2.6.2), la secuencia de Ramsey consta de dos pulsos  $\pi/2$  separados por un tiempo de espera, durante el cual el qubit evoluciona libremente. Si el tiempo de espera se elige de manera adecuada, se observarán oscilaciones en la probabilidad de transición, cuya frecuencia es directamente proporcional a la diferencia de frecuencia entre la frecuencia del pulso aplicado

y la frecuencia resonante del qubit.

Una vez se ha aplicado la secuencia de Ramsey, se mide la probabilidad de transición en función del tiempo de espera y se ajusta una curva sinusoidal a los datos experimentales. La frecuencia de esta curva sinusoidal representa la diferencia de frecuencia entre la frecuencia del pulso aplicado y la frecuencia real del qubit, y su amplitud proporciona información sobre la coherencia del estado cuántico del qubit.

Es importante tener en cuenta que el resultado obtenido mediante la secuencia de Ramsey puede diferir del valor inicialmente ajustado de la frecuencia resonante del qubit. En este caso, se puede utilizar la diferencia de frecuencia obtenida mediante la secuencia de Ramsey para ajustar el valor de la frecuencia del qubit y conseguir así un valor preciso. Por ejemplo, si se obtiene un valor de diferencia de frecuencia de  $df \cong 3.84$  MHz para el qubit 0, este valor se puede compensar con el valor ajustado inicialmente mediante barrido en frecuencia, para obtener así el valor preciso de la frecuencia del qubit. Este proceso es fundamental para garantizar una operación adecuada y precisa del qubit en aplicaciones cuánticas.

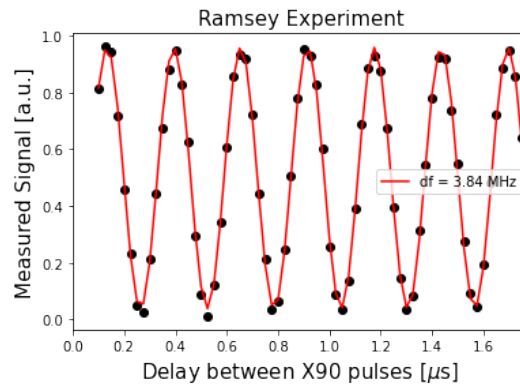


Figura 13: Representación del resultado de medición precisa de la frecuencia del qubit mediante secuencia de pulsos de Ramsey. En el eje de ordenadas (eje y) se representa la señal medida en unidades arbitrarias y en el eje de abscisas (eje x) se representa el retardo entre los pulsos de dicha secuencia (pulsos  $\pi/2$ ). Los puntos negros hacen referencia a una medición de la señal y la línea roja representa el ajuste de la tendencia por mínimos cuadrados de los resultados del experimento. El resultado nos proporciona el valor de diferencia de frecuencia entre el valor obtenido en el experimento del barrido en frecuencia y el valor real de qubit, determinándose en torno a  $df \cong 3.84$  MHz.

Ahora que todos los parámetros han sido calibrados con precisión, podemos realizar nuestros experimentos con confiabilidad y exactitud. Esto incluye la calibración detallada de los diversos qubits necesarios para el experimento, lo que garantiza una fiabilidad óptima en los resultados obtenidos. Esto nos permitirá extraer conclusiones más rigurosas y precisas que nos ayudarán a avanzar en nuestra investigación.



# 4. EXPERIMENTOS

La detección cuántica es una rama de la física cuántica que se enfoca en la medición de sistemas cuánticos y su evolución temporal. La característica fundamental de la detección cuántica es la superposición cuántica (Sec. 2.3), que permite a los sistemas cuánticos existir en múltiples estados al mismo tiempo, lo que los hace muy diferentes a los sistemas clásicos.

En este trabajo, se llevarán a cabo experimentos de detección cuántica en qubits. Estos experimentos se basan en la aplicación de la secuencia de Ramsey (Fig. 6) y Hahn Echo (Fig. 37) en un qubit que se considerará como “sensor”. Este será el objeto de medición y se utilizarán los qubits adyacentes a dicho sensor como señal externa. La aplicación de estas secuencias permitirá evaluar las propiedades cuánticas del qubit sensor, y su respuesta ante perturbaciones externas.

Además, tal y como se explicó en capítulos previos (Sec. 2.1), el efecto Zeeman consiste en la perturbación de la diferencia de energía entre los niveles del qubit debido a la interacción con un campo magnético. Dicha interacción viene precedida de la señal externa generada por los qubits adyacentes al sensor, permitiendo así detectar la presencia de campos magnéticos externos y su influencia sobre los estados cuánticos, impactando en la inestabilidad y coherencia de estos. Estos efectos se verán reflejados por medio de los diferentes parámetros estudiados, como son la frecuencia del qubit sensor y T2. Los efectos en la frecuencia del qubit serán regulados mediante el uso del parámetro "w", el cual representa la perturbación en la frecuencia diferencial evaluada. Esta corresponde a la diferencia entre la frecuencia del pulso de estudio aplicado y la frecuencia real del qubit.

Estos experimentos siguen una línea lógica de mejora y permiten avanzar en el conocimiento y comprensión de los sistemas cuánticos y su comportamiento ante perturbaciones externas. Los resultados obtenidos a partir de estos experimentos tienen un gran potencial para su aplicación en diversas áreas y pueden llevar a avances significativos en la tecnología y el desarrollo de sensores cuánticos.

Antes de entrar en detalle sobre los experimentos, es importante destacar la distribución del ordenador cuántico utilizado para ello (Fig. 14) y comprender cómo la configuración de este influye en los resultados obtenidos. Esto nos permitirá tener una mejor comprensión de los resultados alcanzados y su relevancia para el avance de la tecnología cuántica.



Figura 14: La figura muestra la distribución de los qubits en el ordenador cuántico “ibmq\_manila” que se utilizó para llevar a cabo los experimentos. Cada número representa la identificación única de un qubit específico, y se puede apreciar que existe una disposición lineal de 5 qubits. Es importante destacar que la organización física de los qubits es crucial para su correcto funcionamiento y para obtener resultados precisos en los experimentos. [4]



## 4.1. Experimento 1: Secuencia de pulsos de Ramsey con qubit vecino excitado

Este experimento se centra en detectar perturbaciones en los niveles de energía de un sistema cuántico, definidas por medio del efecto Zeeman. Para lograrlo, se utilizará la técnica de secuencia de pulsos de Ramsey en un qubit seleccionado como sensor (Fig. 4). Además, se añadirá un pulso  $\pi$  en un qubit adyacente, situándolo en un estado que influirá en los niveles de energía del sistema cuántico. Este qubit actuará como señal externa, y su acción estará sincronizada con el primer pulso  $\pi/2$  de la primera secuencia de pulsos (Fig. 15). De esta manera, se busca evaluar cómo esta señal externa afectará la frecuencia del qubit sensor.

La secuencia de pulsos de Ramsey es ampliamente utilizada en la caracterización de sistemas cuánticos y permite medir con precisión la frecuencia de transición de los niveles de energía de los qubits. Al agregar un pulso  $\pi$  en un qubit adyacente, se espera obtener información sobre las perturbaciones en los niveles de energía y cómo estas afectan la frecuencia del qubit sensor.

El proceso de medición, al igual que en el apartado 3.4, consistirá en comparar la frecuencia inicial de referencia con la frecuencia real del qubit después de la aplicación de la señal externa. Si existen modificaciones significativas en la diferencia de frecuencia, se puede inferir que la señal externa ha causado una perturbación en los niveles de energía.

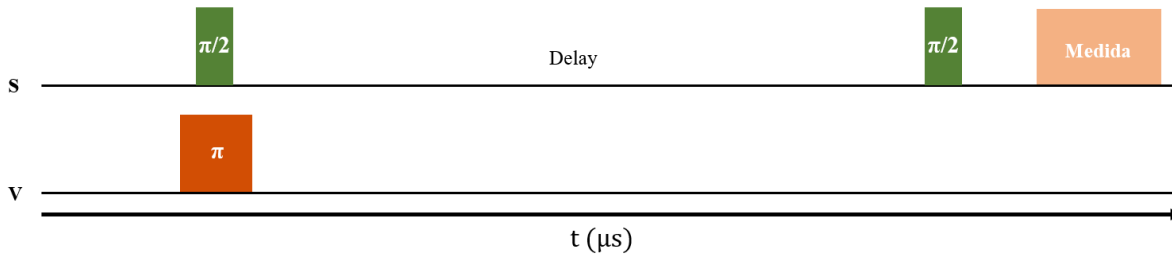


Figura 15: Representación de las secuencias utilizadas en el sensor y en el qubit adyacente para la realización del primer experimento. Observándose una secuencia de pulsos de Ramsey en el qubit utilizado como sensor y un pulso  $\pi$  alineado con el primer pulso  $\pi/2$  de la primera secuencia. “S” hace referencia al qubit sensor, mientras que “V” hace referencia al qubit vecino.

### Resultados

En la Figura 16, se presentan de manera evidente las fluctuaciones en la frecuencia de la señal medida, con un enfoque especial en el escenario en el que el estado del qubit 1 desempeña el papel de señal externa. Estas fluctuaciones, aunque sutiles, son más notorias en comparación con los demás escenarios evaluados. Las diferencias en la frecuencia observadas en este caso alcanzan un valor de aproximadamente kHz, en comparación con una frecuencia base de GHz.

Estos resultados ilustran que, aunque hemos logrado detectar con éxito la señal, aún existe una gran oportunidad para mejorar la sensibilidad de nuestro sensor. Por lo tanto, es fundamental continuar investigando y desarrollando nuevas técnicas para optimizar la precisión de la detección de señales.

Además, he de añadir que este experimento se ha desarrollado únicamente con el qubit 0 como sensor.

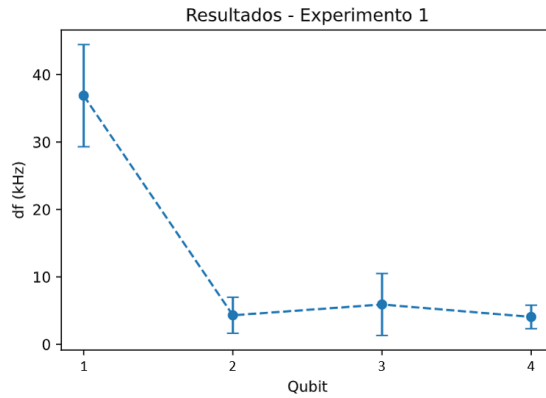


Figura 16: Representación de los resultados obtenidos en el primer experimento (Secuencia de pulsos de Ramsey con qubit vecino excitado), hallados en mediciones realizadas con el qubit 0 como sensor. En el eje de ordenadas (eje y) observamos la diferencia de frecuencia (df), medida en kHz, entre el valor real del qubit y el valor de referencia. En el eje de abscisas (eje x) se representa el qubit vecino que actúa como señal externa en cada caso. Los puntos azules representan el valor medio de las mediciones, y las velas proporcionan el error en cada caso.

Para una comprensión más clara de los resultados del experimento, se han incluido imágenes esclarecedoras que muestran los resultados concretos (Fig. 17). En estas imágenes se puede comparar la diferencia de frecuencia entre la frecuencia real del qubit y la frecuencia de referencia inicial. Además, se puede comparar la diferencia de frecuencia cuando el qubit 1 es excitado y actúa como señal externa y cuando el qubit 2 actúa como señal.

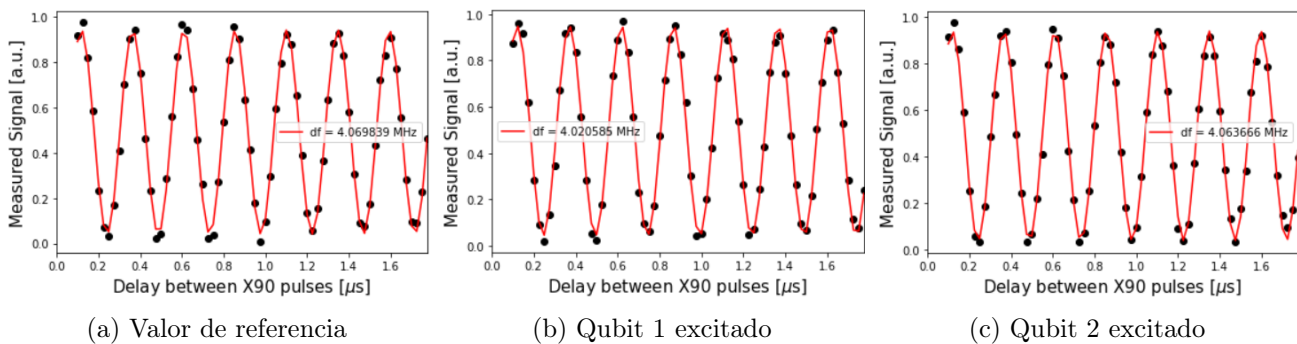


Figura 17: Representación de resultados concretos del experimento tratado para una mejor comprensión. En el eje de ordenadas (eje y) se representa la señal medida en unidades arbitrarias y en el eje de abscisas (eje x) se representa el retardo entre los pulsos de la secuencia. (a) Representa el valor de referencia cuando no hay nada ninguna señal externa producida por qubits excitados. (b) Representa el valor de diferencia de frecuencia cuando el qubit 1 está excitado y actúa como señal externa. (c) Representa el valor de diferencia de frecuencia cuando el qubit 2 está excitado y actúa como señal externa.

## 4.2. Experimento 2: Secuencia de pulsos de Hahn Echo con qubit vecino excitado

Debido a la posibilidad de mejora en la sensibilidad de nuestro sensor, se opta por la aplicación de otra secuencia denominada Hahn Echo (Fig. 37). En este caso, el experimento se basa en el estudio del parámetro  $T_2$  o tiempo de decoherencia. De nuevo, un pulso  $\pi$  será agregado en un qubit adyacente, situándolo en un estado que afectará como señal externa. Su acción estará sincronizada con el primer pulso  $\pi/2$  de la primera secuencia (Fig. 18) y su objetivo es evaluar cómo esta señal externa afecta a la coherencia del sistema, viéndose reflejado por medio del parámetro  $T_2$ .

La secuencia de pulsos de Hahn Echo es ampliamente utilizada en la caracterización de sistemas cuánticos y permite medir con precisión el tiempo de decoherencia  $T_2$ . Al agregar un pulso  $\pi$  en un qubit adyacente, se espera obtener información sobre las perturbaciones de dicho parámetro  $T_2$ , ya que como he mencionado anteriormente, el estado del qubit que actúa como señal externa impactará en la coherencia del sistema cuántico.

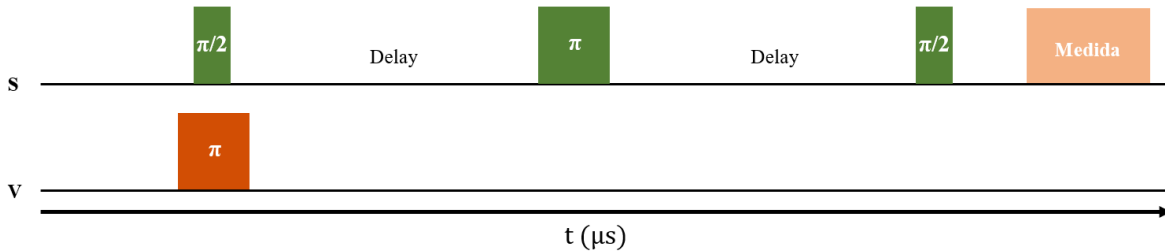


Figura 18: Representación de las secuencias utilizadas en el sensor y en el qubit adyacente para la realización del segundo experimento. Observándose una secuencia de pulsos de Hahn Echo en el qubit utilizado como sensor y un pulso  $\pi$  alineado con el primer pulso  $\pi/2$  de la primera secuencia. “S” hace referencia al qubit sensor, mientras que “V” hace referencia al qubit vecino.

### Resultados

En la Figura 19 se presenta una evaluación exhaustiva y rigurosa de las mediciones efectuadas en los sensores objeto de estudio. Los datos demuestran que las reducciones en el parámetro  $T_2$  son un indicador preciso y fiable de la estimulación de los qubits vecinos más próximos al sensor.

Este análisis de datos permitió también determinar la topología (Fig. 14) de los sensores de manera indirecta, basándose en las variaciones en el parámetro  $T_2$ . La eficacia de los sensores también fue evaluada, y se descubrió que los qubits con valores naturales más elevados exhiben reducciones más acentuadas, concluyendo que la mejor sensibilidad es proporcionada por el qubit 0. Por su parte, el qubit 2 fue el que presentó las reducciones más bajas, siendo determinado, según este experimento, como el sensor con menor sensibilidad.

En conclusión, los hallazgos obtenidos en este estudio representan un avance significativo en la capacidad de detección de señales en comparación con los métodos utilizados anteriormente. Proporcionan una base sólida para futuras investigaciones en este campo y abren nuevas oportunidades para la optimización de los sensores y la mejora de la eficacia en la detección de señales.

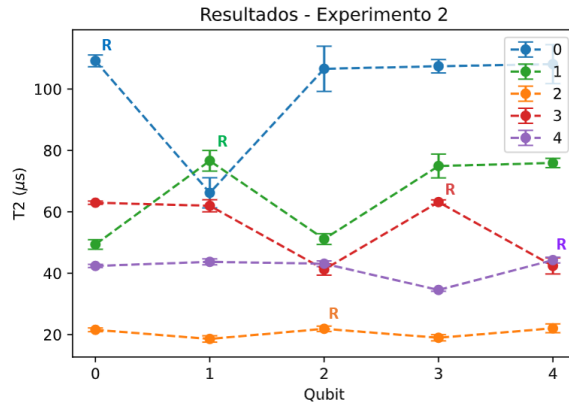


Figura 19: Representación de los resultados obtenidos en el segundo experimento (Secuencia de pulsos de Hahn Echo con qubit vecino excitado), hallados en los diferentes qubits sensores. En el eje de ordenadas (eje y) observamos el valor de T2, medido en microsegundos en el qubit sensor. En el eje de abcisas (eje x) se representa el qubit vecino que actúa como señal en cada caso. El qubit sensor viene reflejado por medio de colores. Los puntos coloreados hacen referencia al valor medio de las mediciones, y las velas proporcionan el error en cada caso. La letra “R” indica que en ese punto de medición no hay qubits vecino excitados, es una medición pura de T2. Es por ello que coincide el qubit sensor con el qubit vecino.

Para una comprensión más clara de los resultados del experimento, se incluyeron imágenes ilustrativas que muestran los resultados concretos (Fig. 20), en mediciones realizadas con el qubit 0 como sensor. En estas imágenes se puede apreciar el valor de T2 resultante de una medición pura, sin señales externas originadas por la estimulación de los estados de qubits adyacentes, y, por otro lado, el valor de T2 medido en el qubit sensor cuando el estado del qubit 1 está estimulado, actuando como señal externa.

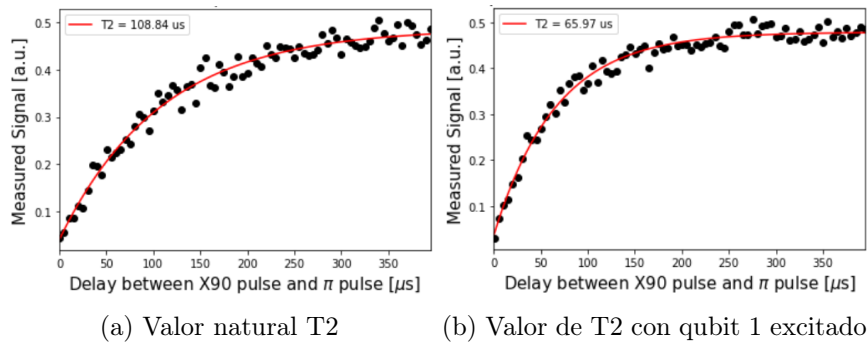


Figura 20: Representación de resultados concretos del experimento tratado para una mejor comprensión. En el eje de ordenadas (eje y) se representa la señal medida en unidades arbitrarias y en el eje de abcisas (eje x) se representa el retardo entre las diferentes puertas de la secuencia. (a) Representa el valor de referencia T2 medido en el qubit 0 cuando no hay señal externa provocado por el estado excitado de qubits adyacentes. (b) Representación del valor de T2 medido en el qubit 0 cuando el estado del qubit 1 está excitado, actuando como señal externa al sensor.

### 4.3. Experimento 3: Secuencia de pulsos de Hahn Echo con pulso simultáneo en qubit vecino

Como consecuencia de la buena sensibilidad de los sensores tras la aplicación de la secuencia Hahn Echo (Fig. 37), se opta por experimentar con una alineación diferente del pulso  $\pi$  en el qubit vecino que actúa como señal externa. La alineación para este experimento consiste en agregar el pulso  $\pi$  en un qubit adyacente, sincronizándolo con el pulso  $\pi$  de la secuencia aplicada en el sensor (Fig. 21). Con ello buscamos perturbar Hahn Echo, modificando el estado del qubit vecino justo a mitad de la secuencia.

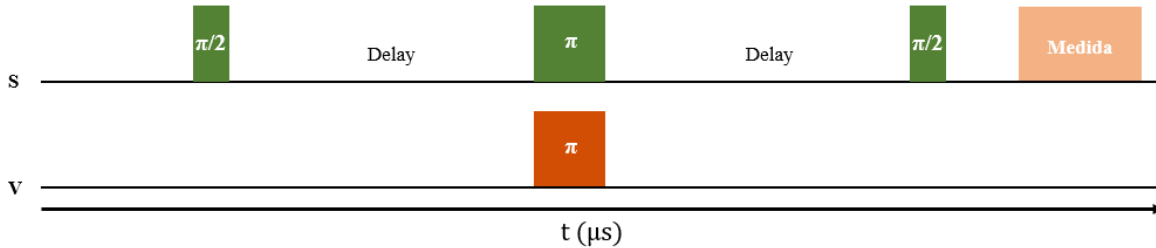


Figura 21: Representación de las secuencias utilizadas en el sensor y en el qubit adyacente para la realización del tercer experimento. Observándose una secuencia de pulsos de Hahn Echo en el qubit utilizado como sensor y un pulso  $\pi$  alineado con el pulso  $\pi$  de la primera secuencia. “S” hace referencia al qubit sensor, mientras que “V” hace referencia al qubit vecino.

#### Resultados

En el presente trabajo, se realizó una evaluación exhaustiva de las mediciones realizadas en los sensores objeto de estudio, como se puede ver en la Figura 20. Los resultados indican de manera clara las reducciones mencionadas en el experimento anterior (Sección 4.2), siendo aún más pronunciadas en el presente experimento (Figura 20a). Además, este estudio reveló un nuevo hallazgo importante, la presencia de oscilaciones en la exponencial esperada de T2 (Figura 20b), que solo se producen cuando se excita el qubit más cercano al sensor. Estas oscilaciones se describen mediante el parámetro "w", que representa su frecuencia.

Este fenómeno se debe a la incapacidad de la secuencia del qubit sensor para compensar el efecto Zeeman debido a que el estado del qubit vecino no es simétrico en torno al pulso  $\pi$ . La frecuencia de las oscilaciones está relacionada con la perturbación en la diferencia de frecuencia observada en el primer experimento (Sección 4.1), donde se registró una perturbación en la medición del qubit 0 de 48 kHz cuando se excitó el estado del qubit 1, valor equivalente a la frecuencia de las oscilaciones producidas en este experimento en la misma situación.

Este experimento logró detectar la señal por medio de las perturbaciones en los dos parámetros que se investigaron en los dos experimentos previos. La continuada mejora de los resultados demuestra una evolución constante en la sensibilidad del sensor, permitiendo una detección clara y eficiente de señales. Además, estos hallazgos fortalecen las conclusiones previas y sentaron las bases sólidas para el desarrollo de una técnica de detección efectiva y confiable. En definitiva, estos resultados son un paso importante hacia la consolidación de la efectividad de los sensores cuánticos en la medición y detección de señales.

Para una mejor comprensión de los resultados, se incluyen imágenes explicativas (Figura 23) que muestran los resultados concretos en mediciones realizadas con el qubit 0 como sensor. Estas imágenes muestran el valor de T2 resultante de una medición pura sin señales externas, el valor de T2 medido en el qubit sensor cuando se excita el estado del qubit 1 y, por último, el valor de T2 medido cuando se excita el estado del qubit 2.

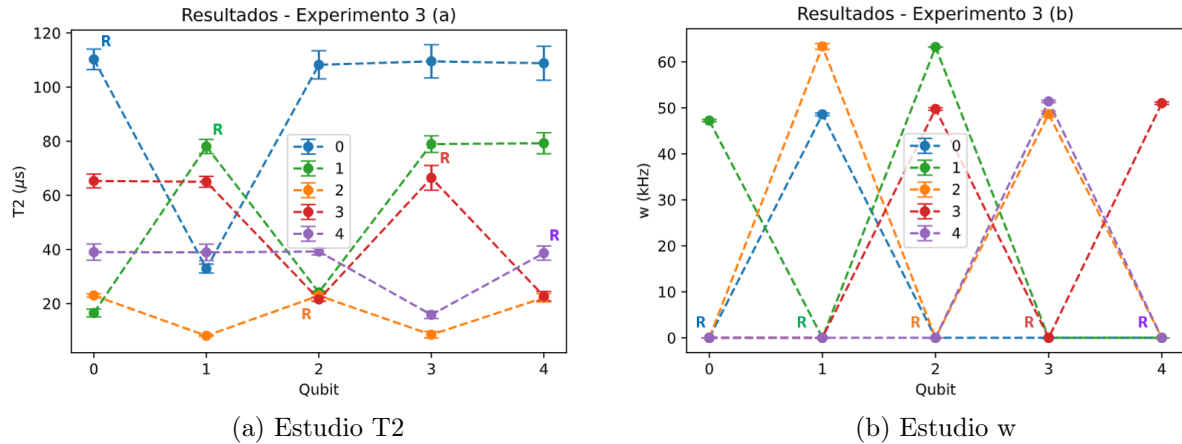


Figura 22: Representación de los resultados obtenidos en el tercer experimento (Secuencia de pulsos de Hahn Echo con pulso simultáneo en qubit vecino), hallados en los diferentes qubits sensores. En el eje de ordenadas (eje y) de la gráfica (a) observamos el valor de T2, medido en microsegundos en el qubit sensor, mientras que en la gráfica (b) se representa el valor de la frecuencia de las oscilaciones, medida en kHz. En esta última, sólo tienen representación aquellos que presentan oscilaciones, manteniendo el resto como 0. En el eje de abcisas (eje x) de ambas se representa el qubit vecio que actúa como señal externa en cada caso. La letra “R” indica que en ese punto de medición no hay qubits vecinos excitados, siendo una señal pura de T2. Es por ello que coincide el qubit sensor con el qubit vecino. Los puntos hacen referencia al valor medio de las mediciones, y las velas proporcionan el error en cada caso.

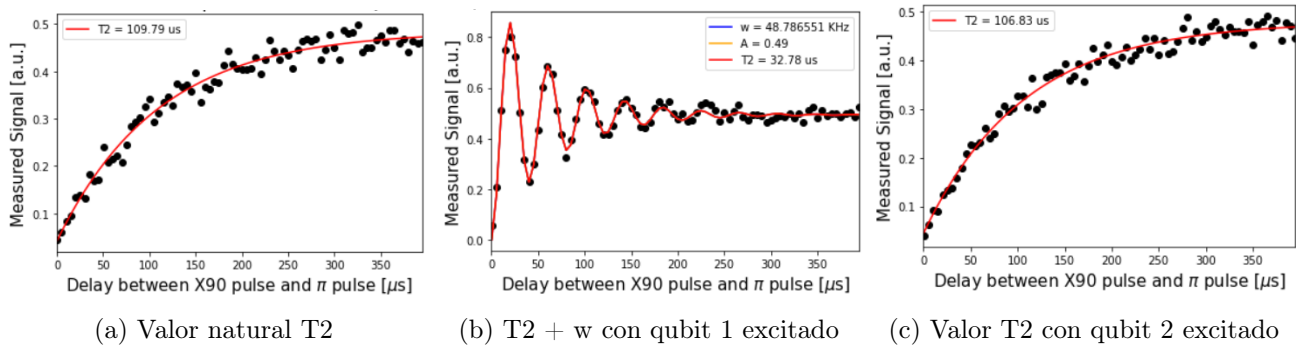


Figura 23: Representación de resultados concretos del experimento tratado para una mejor comprensión. En el eje de ordenadas (eje y) se representa la señal medida en unidades arbitrarias y en el eje de abcisas (eje x) se representa el retardo entre las diferentes puertas de la secuencia. (a) Representa el valor de referencia T2 medido en el qubit 0 cuando no hay señal externa provocada por el estado excitado de qubits adyacentes. (b) Representación del valor de T2 y w medidos en el qubit 0 cuando el estado del qubit 1 está excitado, actuando como señal externa al sensor. (c) Representación del valor de T2 medido en el qubit 0 cuando el estado del qubit 2 está excitado.

### 4.4. Experimento 4: Secuencia de pulsos de Hahn Echo con pulso simultáneo y pulso inicial variable en qubit vecino

Debido a la buena respuesta en la sensibilidad del sensor del anterior experimento, se propone una modificación extra de este. Esta modificación consiste en la aplicación de un pulso variable inicial, sincronizado con el pulso  $\pi/2$  de la secuencia del sensor, cuya rotación se irá ajustando para comprobar su efecto (Fig. 24). El objetivo es observar la dependencia de este pulso con la interacción producida por medio de los parámetros estudiados.

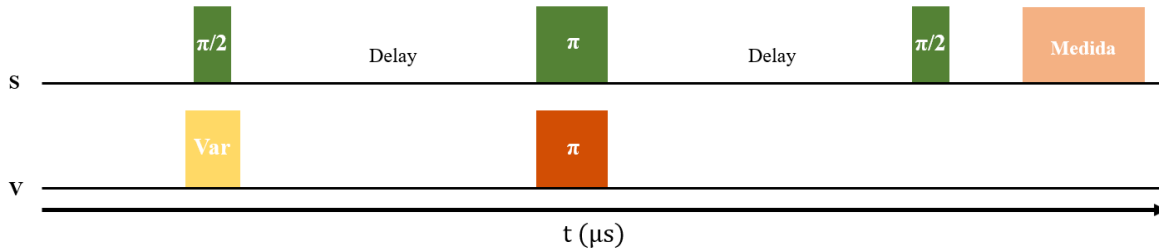


Figura 24: Representación de las secuencias utilizadas en el sensor y en el qubit adyacente para la realización del cuarto experimento. Observándose una secuencia de pulsos de Hahn Echo en el qubit utilizado como sensor, un pulso de rotación variable alineado con el pulso  $\pi/2$  de la secuencia del sensor y un pulso  $\pi$  alineado con el pulso  $\pi$  de la secuencia del sensor nuevamente. “S” hace referencia al qubit sensor, mientras que “V” hace referencia al qubit vecino.

### Resultados

En nuestro estudio, identificamos un patrón de valores ligeramente elevados en T2 cuando la rotación del pulso variable alcanza  $180^\circ$ . Al analizar la frecuencia utilizando el parámetro  $w$ , encontramos una tendencia decreciente claramente relacionada con la rotación del pulso  $\pi$ . Los resultados sugieren una intensificación en los efectos estudiados previamente, aunque de forma muy discreta.

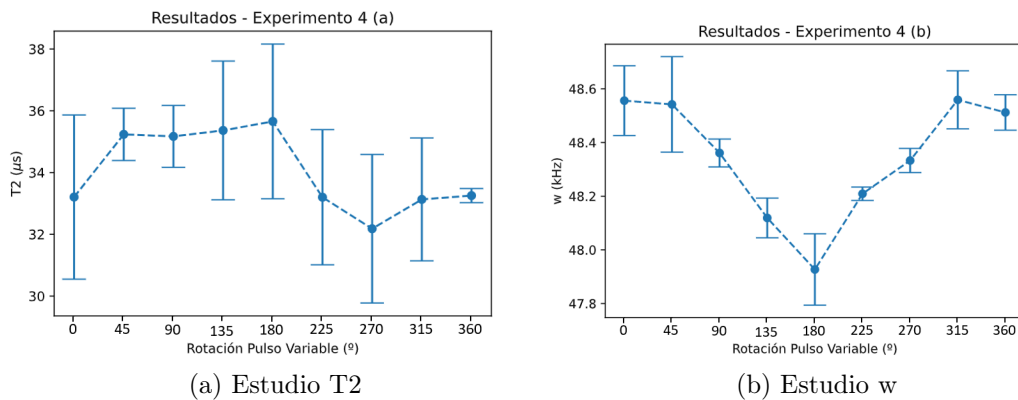


Figura 25: Representación de los resultados obtenidos en el cuarto experimento (Secuencia de pulsos de Hahn Echo con pulso simultáneo y pulso inicial variable en qubit vecino), hallados en mediciones con el qubit 0 como sensor. En el eje de ordenadas (eje y) de la gráfica (a) observamos el valor de T2, medido en microsegundos en el qubit sensor, mientras que en la gráfica (b) se representa el valor de la frecuencia de las oscilaciones, medida en kHz. En el eje de abcisas (eje x) de ambas se representa la rotación del pulso variable del qubit vecino que actúa como señal externa. Los puntos hacen referencia al valor medio de las mediciones, y las velas proporcionan el error en cada caso.

Para una mejor comprensión de los resultados, se incluyen imágenes explicativas (Fig. 26) que muestran los resultados concretos en mediciones realizadas con el qubit 0 como sensor. Estas imágenes muestran el valor de  $T_2$  y  $w$  cuando, no hay pulso inicial, el pulso variable inicial tiene una rotación  $\pi$  y cuando el pulso variable inicial tiene una rotación  $2\pi$ .

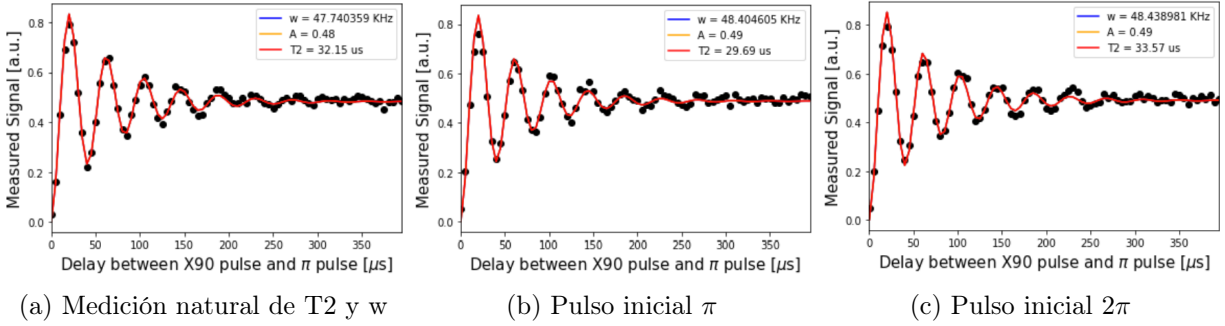


Figura 26: Representación de resultados concretos del experimento tratado para una mejor comprensión medidos con el qubit 0 como sensor. En el eje de ordenadas (eje  $y$ ) se representa la señal medida en unidades arbitrarias y en el eje de abscisas (eje  $x$ ) se representa el retardo entre los diferentes pulsos de la secuencia. (a) Representa el valor de  $T_2$  y  $w$  medido en el qubit 0 cuando no hay señal externa provocada por el estado excitado de los qubits adyacentes. (b) Representa el valor de  $T_2$  y  $w$  medidos cuando el pulso inicial en el qubit vecino que actúa como señal externa tiene una rotación de  $\pi$ . (c) Representa el valor de  $T_2$  y  $w$  medidos cuando el pulso inicial en el qubit vecino que actúa como señal externa tiene una rotación de  $2\pi$ .



## 4.5. Justificación de la rotación y posición de los pulsos aplicados en qubit vecino

En los experimentos detallados anteriormente, hemos tomado algunos supuestos que es importante justificar y explicar en detalle. Uno de ellos es la elección de la rotación del pulso vecino que actúa como una señal externa. También es necesario detallar las razones detrás de la posición elegida para dicho pulso. Estos supuestos son cruciales para entender el desempeño de los experimentos y los resultados obtenidos. En esta sección, se profundizará en la justificación de estos supuestos y se proporcionará una explicación detallada de por qué se han tomado estas decisiones en la conducta de los experimentos.

### 4.5.1. Pulso $\pi$ máxima señal

En los experimentos descritos anteriormente, se ha demostrado la importancia fundamental de la rotación del pulso en el qubit vecino en su papel como señal externa en la detección de la señal. En todos los casos, se ha elegido una rotación de  $\pi$ , y los resultados han indicado que esta rotación es capaz de proporcionar la señal más fuerte. Debido a ello, es esencial analizar y justificar la elección de esta rotación específica. En este inciso, se profundizará en la evaluación de los resultados obtenidos y se presentará una argumentación rigurosa y concluyente que explique por qué se ha elegido la rotación de  $\pi$  para el qubit vecino. Para lograr esto, se llevará a cabo una secuencia Hahn Echo en el qubit sensor y un pulso de rotación variable que se sincronice con el primer pulso  $\pi/2$  de la secuencia del sensor en el qubit vecino que actúa como señal externa (Fig. 27).

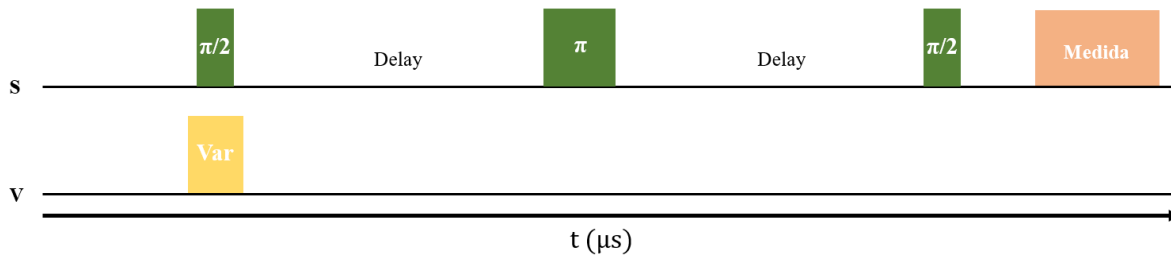


Figura 27: Representación de las secuencias utilizadas en el sensor y en el qubit adyacente para la realización de la primera justificación. Observándose una secuencia de pulsos de Hahn Echo en el qubit utilizado como sensor y un pulso de rotación variable alineado con el pulso  $\pi/2$  de la secuencia del sensor. “S” hace referencia al qubit sensor, mientras que “V” hace referencia al qubit vecino.

## Resultados

En los experimentos realizados, se ha demostrado que el uso del pulso de rotación  $\pi$  genera la máxima señal detectada en todos los experimentos presentados en este trabajo. Esto se puede apreciar claramente en la Figura 28. Este resultado brinda una sólida justificación para la elección del pulso  $\pi$  en los experimentos y es un indicativo importante de la efectividad de su uso.

Además, es importante destacar que la máxima señal detectada se corresponde con la máxima perturbación de los factores relevantes en los experimentos, lo que permite obtener resultados más concluyentes y precisos. Por lo tanto, el uso del pulso de rotación  $\pi$  se considera una estrategia clave para obtener resultados más destacables en este tipo de experimentos.

Otra de las conclusiones que podemos llegar con este experimento es descartar que las perturbaciones vistas en experimentos previos sean causadas por el ruido electrónico de excitar qubits vecinos al sensor.

Esta hecho se debe a que el impacto de un pulso  $2\pi$  es similar a no aplicar ningún pulso, por lo tanto, podemos descartar con evidencia dicha hipótesis.

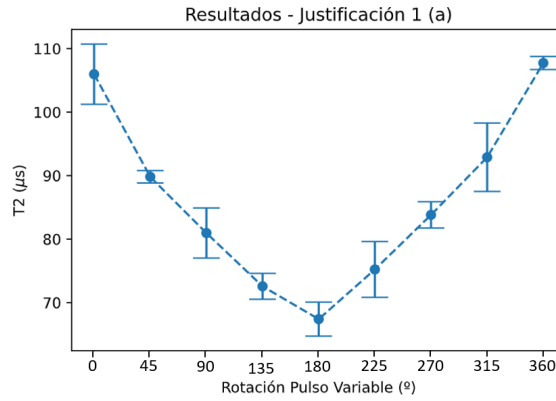


Figura 28: Representación de los resultados obtenidos en el primer experimento de justificación (Pulso  $\pi$  máxima señal), hallados en mediciones realizadas con el qubit 0 como sensor. En el eje de ordenadas (eje y) se representa el valor de T2 del qubit sensor en microsegundos. En el eje de abscisas (eje x) se representa la rotación del pulso variable del qubit vecino que actúa como señal externa. Los puntos hacen referencia al valor medio de las mediciones, y las velas proporcionan el error en cada caso.

Para una mejor comprensión de los resultados, se incluyen imágenes explicativas (Fig. ??) que muestran los resultados concretos en mediciones realizadas con el qubit 0 como sensor. Estas imágenes muestran el valor de T2 cuando, no hay pulso inicial y pr tanto no hay señal externa generada por el estado de qubits adyacentes, el pulso inicial que actúa como señal externa tiene una rotación de  $\pi$  y cuando el pulso inicial tiene una rotación de  $2\pi$ .

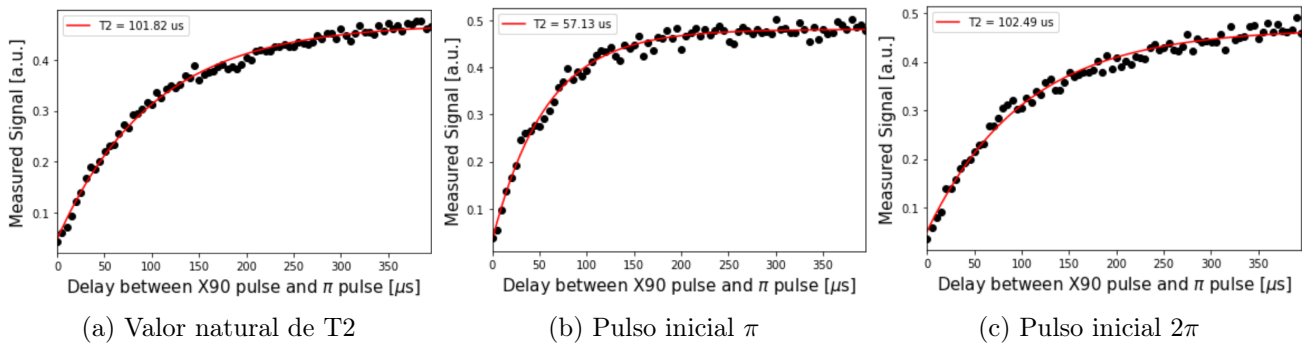


Figura 29: Representación de resultados concretos del experimento tratado para una mejor comprensión medidos con el qubit 0 como sensor. En el eje de ordenadas (eje y) se representa la señal medida en unidades arbitrarias y en el eje de abscisas (eje x) se representa el retardo entre los diferentes pulsos de la secuencia. (a) Representa el valor de T2 medido en el qubit 0 cuando no hay señal externa provocada por el estado excitado de los qubits adyacentes. (b) Representa el valor de T2 medido cuando el pulso inicial en el qubit vecino que actúa como señal externa tien una rotación de  $\pi$ . (c) Representa el valor de T2 medido cuando el pulso inicial en el qubit vecino que actúa como señal externa tien una rotación de  $2\pi$ .

### 4.5.2. Alineaciones de pulsos

Después de haber considerado la importancia de la aplicación del pulso de rotación  $\pi$  en el qubit vecino que actuará como señal externa, es crucial determinar la posición idónea para dicho pulso. Para ello, se llevará a cabo un exhaustivo estudio de las tres posiciones clave en relación con la secuencia Hahn Echo en el sensor.

La primera posición consiste en sincronizar el pulso  $\pi$  con el primer pulso  $\pi/2$  de la secuencia (Fig. 18). La segunda posición tiene como objetivo hacer coincidir el pulso  $\pi$  con el pulso  $\pi$  en la secuencia (Fig. 21). Finalmente, en la tercera posición, se sincroniza el pulso  $\pi$  con el último pulso  $\pi/2$  de la secuencia Hahn Echo (Fig. 30). Estas posiciones corresponderán numéricamente con los valores 1, 2 y 3, respectivamente. Siendo el valor 0 el correspondiente a la medición natural del valor T2 del qubit sensor.

Este análisis detallado permitirá establecer la posición óptima para el pulso de rotación  $\pi$  en relación a la secuencia Hahn Echo, proporcionando una mayor precisión y eficacia en los resultados del sensor.

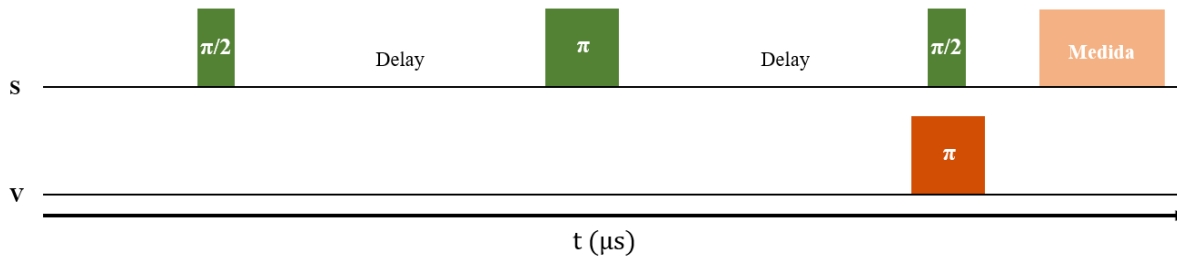


Figura 30: Representación de las secuencias utilizadas en el sensor y en el qubit adyacente para la realización de la segunda justificación. Observándose una secuencia de pulsos de Hahn Echo en el qubit utilizado como sensor y un pulso  $\pi$  alineado con el último pulso  $\pi/2$  de la primera secuencia. “S” hace referencia al qubit sensor, mientras que “V” hace referencia al qubit vecino.

## Resultados

Los resultados obtenidos en nuestro análisis revelan dos importantes conclusiones (Fig. 33). En primer lugar, se ha identificado la presencia de dos formas distintas de perturbación en las mediciones del sensor, dependiendo de la alineación del pulso. Cuando el pulso está alineado en la parte inicial o final, se observa una significativa disminución en el tiempo de coherencia T2. Sin embargo, el pulso intermedio, además de la disminución en T2, también produce oscilaciones notables tal y como hemos visto en apartados anteriores (Sec. 4.3).

En lugar, se ha determinado que las posiciones objeto de estudio más interesantes se dan cuando el pulso se sitúa inicialmente, ya que podemos estudiar las reducciones en sí. Y, cuando el pulso se sincroniza en la parte intermedia, consiguiendo hallazgos interesantes como las oscilaciones y las pronunciadas reducciones del parámetro T2 resultantes.

Para una mejor comprensión de los resultados, se incluyen imágenes explicativas (Fig. 32) que muestran los resultados concretos en mediciones realizadas con el qubit 0 como sensor. Estas imágenes muestran el valor de T2 cuando, no hay pulso inicial y por tanto no hay señal externa generada por el estado de qubits adyacentes, el pulso inicial que actúa como señal externa tiene una rotación de  $\pi$  y cuando el pulso inicial tiene una rotación de  $2\pi$ .

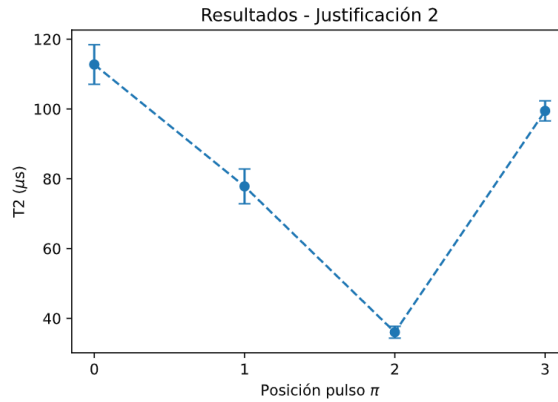


Figura 31: Representación de los resultados obtenidos en el segundo experimento de justificación (Alineaciones de pulsos), hallados en mediciones realizadas con el qubit 0 como sensor. En el eje de ordenadas (eje y) se representa el valor de T2 del qubit sensor en microsegundos. En el eje de abcisas (eje x) se representa la referencia de la posición del pulso  $\pi$  del qubit vecino que actúa como señal externa. Estas posiciones. Estas referencias, 0, 1, 2, 3, representan la medición del valor natural de T2 del qubit en el qubit sensor, la sincronización del pulso  $\pi$  con el primer pulso  $\pi/2$  de la secuencia, la sincronización del pulso  $\pi$  con el pulso  $\pi$  de la secuencia y a sincronización del pulso  $\pi$  con el último pulso  $\pi/2$  de la secuencia. Los puntos hacen referencia al valor medio de las mediciones, y las velas proporcionan el error en cada caso.

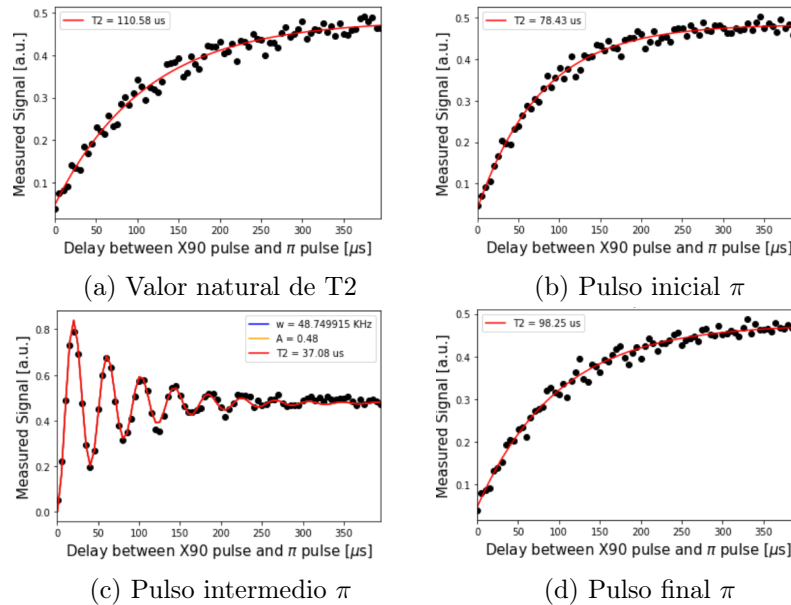


Figura 32: Representación de resultados concretos del experimento tratado para una mejor comprensión medidos con el qubit 0 como sensor. En el eje de ordenadas (eje y) se representa la señal medida en unidades arbitrarias y en el eje de abcisas (eje x) se representa el retardo entre los diferentes pulsos de la secuencia. (a) Representa el valor de T2 medido en el qubit 0 cuando no hay señal externa provocada por el estado excitado de los qubits adyacentes. (b) Representa el valor de T2 medido cuando el pulso  $\pi$  en el qubit vecino que actúa como señal externa se encuentra en la posición inicial. (c) Representa el valor de T2 medido cuando el pulso  $\pi$  en el qubit vecino que actúa como señal externa se encuentra en la posición intermedia. (d) Representa el valor de T2 medido cuando el pulso  $\pi$  en el qubit vecino que actúa como señal externa se encuentra en la posición final.

# 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS: LA CLAVE DEL ENTRELAZAMIENTO

Los resultados obtenidos en los distintos experimentos suscitan dudas acerca de la existencia y la naturaleza de las perturbaciones observadas en los valores de los parámetros estudiados en el qubit sensor. Una de las hipótesis principales apunta al ruido electrónico producido por la excitación de los qubits no sensores mediante pulsos electromagnéticos. Sin embargo, esta hipótesis ha sido indirectamente descartada por experimentos previos (Sec. 4.5.1), donde se ha constatado que no existen diferencias significativas entre el impacto de un pulso de  $360^\circ$  o  $2\pi$  y no aplicarlo. En consecuencia, si la aplicación de un pulso  $2\pi$  no produce perturbaciones en los parámetros estudiados, el pulso electromagnético no es la causa de dichas perturbaciones, sino que éstas deben atribuirse al estado del qubit que actúa como señal externa.

Ante esta situación, surge la necesidad de identificar otras posibles causas de las perturbaciones observadas. Una hipótesis que se considera es el entrelazamiento cuántico, para lo cual se ha llevado a cabo un estudio mediante la técnica de tomografía cuántica de estados.

Esta técnica permite obtener información acerca del estado de un sistema cuántico, el cual no es determinado hasta que se le mide. Es por ello que es necesario realizar una serie de mediciones en diferentes bases (Fig. 36 - 44), con el objetivo de controlar las posibilidades de obtener al sistema en un estado u otro.

## 5.1. Pureza del sistema cuántico

El objetivo principal de este estudio es evaluar la pureza de los qubits de forma individual y conjunta. Para ello, se realizarán mediciones en diferentes bases y se procesarán los resultados obtenidos para determinar la pureza de los qubits.

La pureza de un qubit se define como el módulo de su vector de Bloch. Un vector de módulo 1 representa un estado puro, mientras que un módulo menor que 1 indica que el estado del qubit está mezclado y ha sido afectado por efectos de decoherencia y desfase.

La pureza del estado conjunto de dos qubits entrelazados es una medida de la coherencia cuántica compartida entre ambos. Se utiliza para cuantificar la calidad y cantidad de entrelazamiento presente en el sistema. Una alta pureza del estado conjunto y una baja pureza en los estados individuales indican que los dos qubits están fuertemente entrelazados, mientras que una baja pureza indica que los qubits están poco o nada entrelazados. El cálculo de la pureza del estado conjunto es más complejo y se explicará en detalle más adelante.

### 5.1.1. Procedimiento

El objetivo es reconstruir el estado de los qubits en función del tiempo. El vector de Bloch de un qubit se puede obtener mediante medidas en la dirección X, Y, Z, y sus valores esperados. En el caso de un qubit las bases son X, Y y Z. Mientras que las bases de dos qubits son  $X_0X_1$ ,  $X_0Y_1$ ,  $X_0Z_1$ ,  $Y_0X_1$ ,  $Y_0Y_1$ ,  $Y_0Z_1$ ,  $Z_0X_1$ ,  $Z_0Y_1$  y  $Z_0Z_1$ .

Una vez concretada la base de medición, podemos empezar la reconstrucción. El primer paso es sumar las probabilidades de los resultados 10 y 11 de la medición, ya que recogerán la probabilidad total del qubit 0

en el estado 1 de la respectiva base de medición. Este término será definido como  $X0$ , donde “X” representa la base y “0” el qubit de medición. Posteriormente, a este valor se le resta 0.5 y se multiplica por dos para poder ajustar el vector a los límites de la esfera, obteniendo el valor esperado  $\langle X0 \rangle$ . De esta misma forma se realiza  $\langle Y0 \rangle$  y  $\langle Z0 \rangle$ . El procedimiento queda de la siguiente forma:

$$\langle X0 \rangle = [(p(10)_{XX} + p(11)_{XX}) - 0,5] * 2 \quad (5.1)$$

$$\langle Y0 \rangle = [(p(10)_{YY} + p(11)_{YY}) - 0,5] * 2 \quad (5.2)$$

$$\langle Z0 \rangle = [(p(10)_{ZZ} + p(11)_{ZZ}) - 0,5] * 2 \quad (5.3)$$

Una vez obtenidos los 3 valores esperados  $\langle X0 \rangle$ ,  $\langle Y0 \rangle$  y  $\langle Z0 \rangle$ , podemos hallar el vector de Bloch del qubit 0.

$$\vec{p}_0(t) = [(\langle X0 \rangle, \langle Y0 \rangle, \langle Z0 \rangle)] * 0,5 + 0,5 \quad (5.4)$$

Donde su módulo se representa como:

$$|p_0|(t) = [(\langle X0 \rangle^2 + \langle Y0 \rangle^2 + \langle Z0 \rangle^2) * 0,5] + 0,5 \quad (5.5)$$

De igual manera, podemos obtener la reconstrucción del qubit 1.

$$\langle X1 \rangle = [(p(01)_{XX} + p(11)_{XX}) - 0,5] * 2 \quad (5.6)$$

$$\langle Y1 \rangle = [(p(01)_{YY} + p(11)_{YY}) - 0,5] * 2 \quad (5.7)$$

$$\langle Z1 \rangle = [(p(01)_{ZZ} + p(11)_{ZZ}) - 0,5] * 2 \quad (5.8)$$

$$\vec{p}_1(t) = [(\langle X1 \rangle, \langle Y1 \rangle, \langle Z1 \rangle)] * 0,5 + 0,5 \quad (5.9)$$

$$|p_1|(t) = [(\langle X1 \rangle^2 + \langle Y1 \rangle^2 + \langle Z1 \rangle^2) * 0,5] + 0,5 \quad (5.10)$$

Una vez halladas las perezas individuales pasamos a hallar la pureza del estado conjunto qubit0-qubit1.

Para ello serán necesarios 15 términos, 3 correspondientes al qubit 0 (Ec. 5.1, 5.2, 5.3) al cuadrado, 3 correspondientes al qubit 1 (Ec. 5.6, 5.7, 5.8) al cuadrado y los 9 términos conjuntos.

Donde los términos conjuntos se hallan de la siguiente forma:

$$\langle X0X1 \rangle = [(p(11)_{XX} - X0/2 - X1/2) + 0,25] * 2 \quad (5.11)$$

$$\langle X0Y1 \rangle = [(p(11)_{XY} - X0/2 - Y1/2) + 0,25] * 2 \quad (5.12)$$

$$\langle X0Z1 \rangle = [(p(11)_{XZ} - X0/2 - Z1/2) + 0,25] * 2 \quad (5.13)$$

$$\langle Y0X1 \rangle = [(p(11)_{YX} - Y0/2 - X1/2) + 0,25] * 2 \quad (5.14)$$

$$\langle Y0Y1 \rangle = [(p(11)_{YY} - Y0/2 - Y1/2) + 0,25] * 2 \quad (5.15)$$

$$\langle Y0Z1 \rangle = [(p(11)_{YZ} - Y0/2 - Z1/2) + 0,25] * 2 \quad (5.16)$$

$$\langle Z0X1 \rangle = [(p(11)_{ZX} - Z0/2 - X1/2) + 0,25] * 2 \quad (5.17)$$

$$\langle Z0Y1 \rangle = [(p(11)_{ZY} - Z0/2 - Y1/2) + 0,25] * 2 \quad (5.18)$$

$$\langle Z0Z1 \rangle = [[(p(11))_{ZZ} - Z0/2 - Z1/2] + 0,25] * 2 \quad (5.19)$$

A la suma de estos 9 términos conjuntos al cuadrado la definimos como  $\langle Q0Q1 \rangle$ :

$$\langle Q0Q1 \rangle = [\langle X0X1 \rangle^2 + \langle X0Y1 \rangle^2 + \langle X0Z1 \rangle^2 + \langle Y0X1 \rangle^2 + \langle Y0Y1 \rangle^2 + \langle Y0Z1 \rangle^2 + \langle Z0X1 \rangle^2 + \langle Z0Y1 \rangle^2 + \langle Z0Z1 \rangle^2] \quad (5.20)$$

Una vez obtenidos los 15 términos necesarios, podemos hallar la pureza del estado conjunto:

$$|p_{0-1}(t)| = [\langle Q0Q1 \rangle + (\langle X0 \rangle^2 + \langle Y0 \rangle^2 + \langle Z0 \rangle^2 + \langle X1 \rangle^2 + \langle Y1 \rangle^2 + \langle Z1 \rangle^2)/4] + 0,25 \quad (5.21)$$

Una vez obtenidos los módulos de los 3 vectores requeridos para el estudio de la evolución temporal de la pureza, se procede a representarlos para analizarlos.

## Resultados

Un indicio de entrelazamiento mediante la evolución temporal de la pureza de los qubits, es que la pureza del estado conjunto sea mayor que el producto de las purezas de cada qubit individual.

Por lo tanto, tal y como se observa en la figura 33, la pureza del estado conjunto es algo mayor en que la pureza de por separado de los qubits individuales en los primeros 30 microsegundos de la representación, correspondientes a los 15 primeros pasos temporales. Este hecho nos indica un posible indicio de entrelazamiento cuántico.

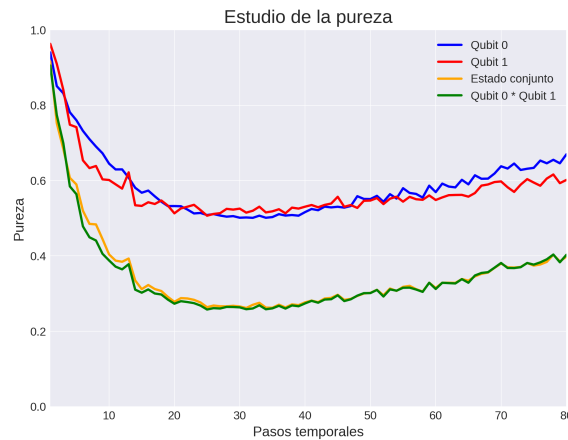


Figura 33: Representación de la evolución de la pureza en diferentes casos de estudio. El eje de ordenadas (eje y) representa la pureza del estado correspondiente con un límite entre 0 y 1. El eje de abscisas (eje x) representa los pasos temporales del margen estudiado en la evolución. Cada paso corresponde a 2.5 microsegundos lo que define el límite del eje entre 0 y 200 microsegundos.

A la vista de las conclusiones y el posible indicio de entrelazamiento cuántico entre los dos qubits de estudio se procede a la aplicación del criterio Peres-Horodecki con el objetivo de obtener resultados esclarecedores.

## 5.2. Criterio Peres-Horodecki

El criterio de Peres-Horodecki [1] nos permitirá tener una perspectiva más esclarecedora, pudiendo así determinar la naturaleza de las señales detectadas.

Para ello será necesario construir la matriz de densidad  $\rho$ , la cual describe el estado del sistema cuántico y contiene información sobre las probabilidades de obtenerlo en un estado u otro.

Un estado cuántico arbitrario de dos qubits puede ser expresado como:

$$\rho = \frac{1}{4} \cdot I_4 + \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^{15} \lambda_i \cdot \hat{\lambda}_i \quad (5.22)$$

Los términos  $\lambda_i$  corresponden a mediciones en la diferentes bases y se definen como:

$$\lambda_1 = [(p(10)_{XX} + p(11)_{XX}) - 0,5] \cdot \sqrt{2} \quad (5.23)$$

$$\lambda_2 = [(p(10)_{YY} + p(11)_{YY}) - 0,5] \cdot \sqrt{2} \quad (5.24)$$

$$\lambda_3 = [(p(10)_{ZZ} + p(11)_{ZZ}) - 0,5] \cdot \sqrt{2} \quad (5.25)$$

$$\lambda_4 = [(p(01)_{XX} + p(11)_{XX}) - 0,5] \cdot \sqrt{2} \quad (5.26)$$

$$\lambda_5 = [(p(01)_{YY} + p(11)_{YY}) - 0,5] \cdot \sqrt{2} \quad (5.27)$$

$$\lambda_6 = [(p(01)_{ZZ} + p(11)_{ZZ}) - 0,5] \cdot \sqrt{2} \quad (5.28)$$

$$\lambda_7 = [(p(11)_{XX} - X0/2 - X1/2) + 0,25] \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \quad (5.29)$$

$$\lambda_8 = [(p(11)_{XY} - X0/2 - Y1/2) + 0,25] \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \quad (5.30)$$

$$\lambda_9 = [(p(11)_{XZ} - X0/2 - Z1/2) + 0,25] \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \quad (5.31)$$

$$\lambda_{10} = [(p(11)_{YX} - Y0/2 - X1/2) + 0,25] \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \quad (5.32)$$

$$\lambda_{11} = [(p(11)_{YY} - Y0/2 - Y1/2) + 0,25] \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \quad (5.33)$$

$$\lambda_{12} = [(p(11)_{YZ} - Y0/2 - Z1/2) + 0,25] \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \quad (5.34)$$

$$\lambda_{13} = [(p(11)_{ZX} - Z0/2 - X1/2) + 0,25] \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \quad (5.35)$$

$$\lambda_{14} = [(p(11)_{ZY} - Z0/2 - Y1/2) + 0,25] \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \quad (5.36)$$

$$\lambda_{15} = [(p(11)_{ZZ} - Z0/2 - Z1/2) + 0,25] \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \quad (5.37)$$

Por otro lado,  $\hat{\lambda}_i$  se define como:

$$\hat{\lambda}_i = \frac{1}{2^{1/2}} \cdot \sigma_i \otimes I_2, \quad i = 1, 2, 3 \quad (5.38)$$

$$\hat{\lambda}_i = \frac{1}{2^{1/2}} \cdot I_2 \otimes \sigma_{i-3}, \quad i = 4, 5, 6 \quad (5.39)$$

$$\hat{\lambda}_i = \frac{1}{2^{1/2}} \cdot \sigma_1 \otimes \sigma_{i-6}, \quad i = 7, 8, 9 \quad (5.40)$$

$$\hat{\lambda}_i = \frac{1}{2^{1/2}} \cdot \sigma_2 \otimes \sigma_{i-9}, \quad i = 10, 11, 12 \quad (5.41)$$



$$\hat{\lambda}_i = \frac{1}{2^{1/2}} \cdot \sigma_3 \otimes \sigma_{i-12}, \quad i = 13, 14, 15 \quad (5.42)$$

Donde  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  quedan definidas en la ecuación 2.4 e  $I_2$  es la matriz identidad 2x2.

A los términos  $\hat{\lambda}_2$ ,  $\hat{\lambda}_{10}$ ,  $\hat{\lambda}_{11}$  y  $\hat{\lambda}_{12}$  se les aplica un cambio de signo. Este cambio es necesario para garantizar que la matriz densidad  $\rho$  represente correctamente un estado entrelazado en el caso que lo haya.

El entrelazamiento se caracteriza por la existencia de correlaciones cuánticas no locales entre dos o más qubits. En el caso de un estado de dos qubits entrelazados, los valores de las amplitudes de probabilidad para los estados  $|00\rangle$  y  $|11\rangle$  están relacionados de manera no trivial y no pueden ser explicados como una simple superposición de los estados individuales de los qubits.

En el caso de un estado entrelazado, la modificación de los operadores  $\hat{\lambda}_2$ ,  $\hat{\lambda}_{10}$ ,  $\hat{\lambda}_{11}$  y  $\hat{\lambda}_{12}$  que corresponden al qubit 1 permiten representar correctamente estas correlaciones no locales en la matriz densidad  $\rho$ . Si estos no se modifican, entonces la representación de la matriz densidad  $\rho$  podría no capturar completamente el entrelazamiento en el estado cuántico de dos qubits.

Esto se debe a que un estado cuántico tiene propiedades unitarias y si le cambias algunos aspectos relevantes, les ponemos algunos signos menos, debería continuar siendo unitario si no hay entrelazamiento. Pero, si hay entrelazamiento deja de ser unitario, viéndose reflejado en autovalores negativos de la densidad matriz  $\rho$ .

Una vez que tenemos todos los términos necesarios para la creación de la matriz densidad  $\rho$ , la diagonalizamos para cada instante de tiempo de la evolución y representamos los autovalores con parte real más pequeña en cada momento.

## Resultados

En consonancia con las expectativas del estudio anterior, nuestros resultados (Fig. 34) demuestran de forma concluyente que los dos qubits se encuentran entrelazados en los primeros instantes de la evolución, específicamente en los primeros treinta microsegundos del experimento. Este fenómeno se produce debido a la presencia de autovalores negativos en la matriz de densidad del sistema, lo cual indica que el estado cuántico de los qubits no puede ser descrito como una combinación de estados cuánticos separados de las dos partes.

En la Figura 34, se muestra la evolución temporal de los autovalores del sistema, tanto en su parte real como imaginaria en función del tiempo. Sin embargo, dada la naturaleza de los autovalores como valores reales, se ha detectado un pequeño error numérico en la parte imaginaria, la cual es prácticamente nula. Por esta razón, hemos generado una nueva gráfica (Fig. 35) que representa solo la parte real de los autovalores.

En resumen, la existencia del entrelazamiento cuántico significa que el estado del sistema no puede ser descrito como si cada parte estuviera en un estado propio. En su lugar, las dos partes del sistema están intrínsecamente relacionadas, de manera que cualquier cambio en una de las partes afectará el estado del sistema completo.

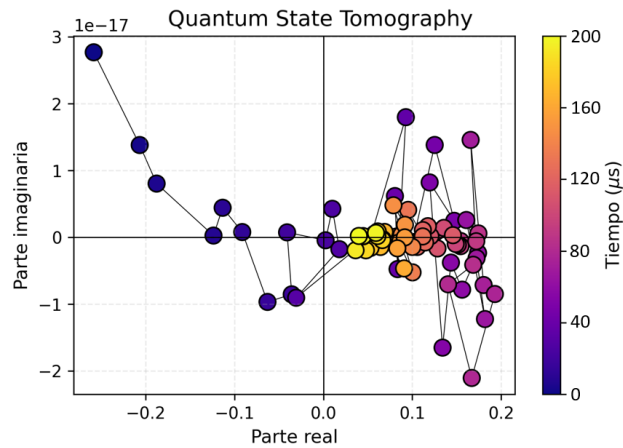


Figura 34: Representación de los autovalores en cada instante de la evolución en el proceso “Quantum State Tomography”. En el eje de ordenadas (eje y) se representa la parte imaginaria de estos autovalores. En el eje de abscisas (eje x) se representa la parte real de los autovalores.



Figura 35: Representación de la parte real de los autovalores en cada instante de la evolución en el proceso “Quantum State Tomography”. En el eje de ordenadas (eje y) se representa la parte real de los autovalores. En el eje de abscisas (eje x) se representa la evolución temporal de estos.

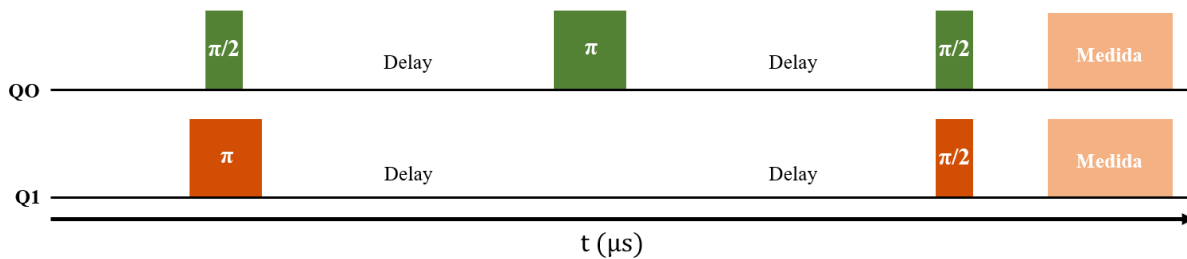


Figura 36: Representación de la secuencia para la medición en la base XX.

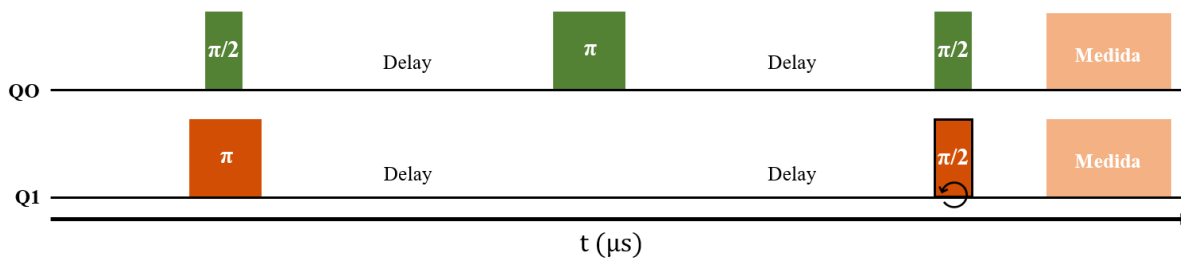


Figura 37: Representación de la secuencia para la medición en la base XY.

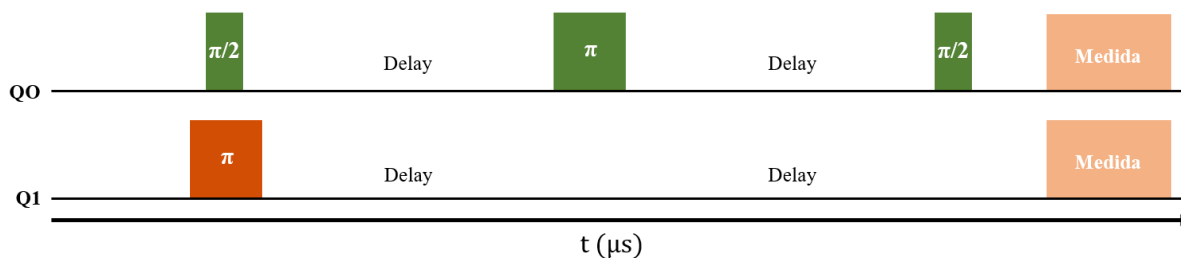


Figura 38: Representación de la secuencia para la medición en la base XZ.

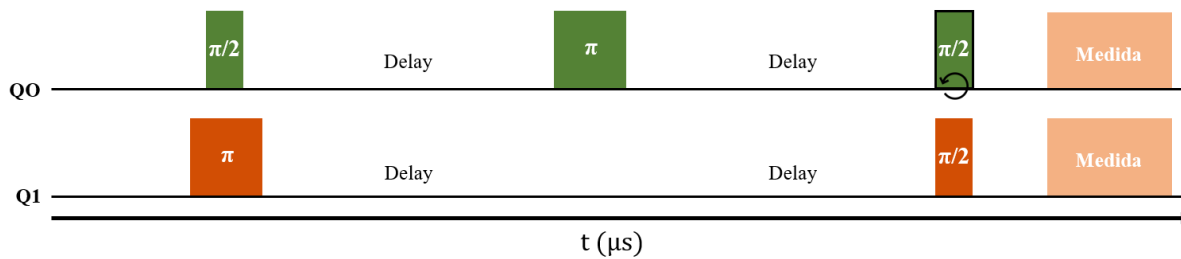


Figura 39: Representación de la secuencia para la medición en la base YX.

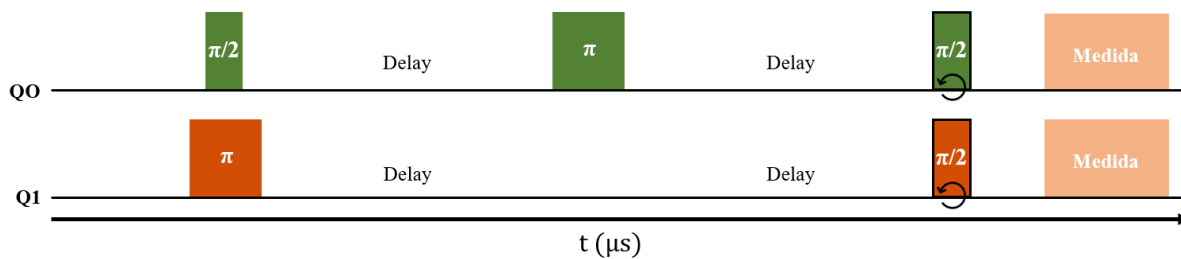


Figura 40: Representación de la secuencia para la medición en la base YY.

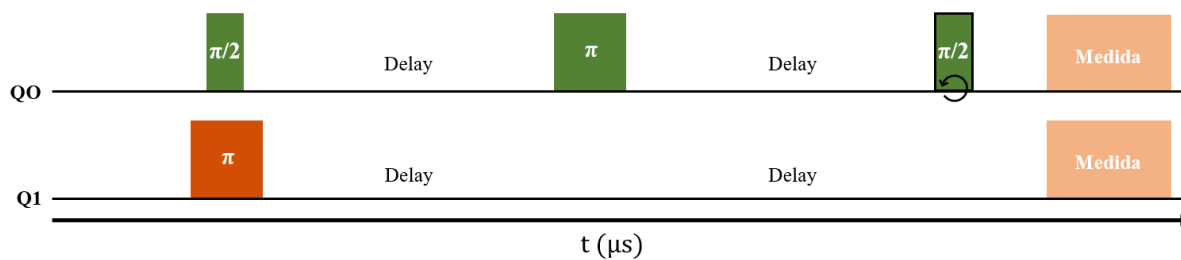


Figura 41: Representación de la secuencia para la medición en la base YZ.

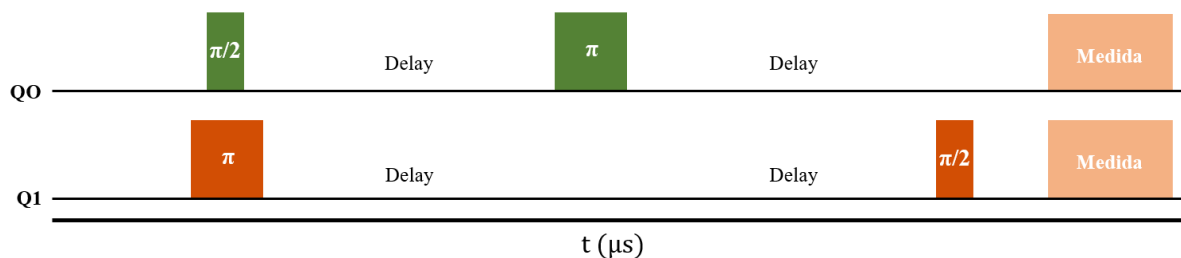


Figura 42: Representación de la secuencia para la medición en la base ZX.

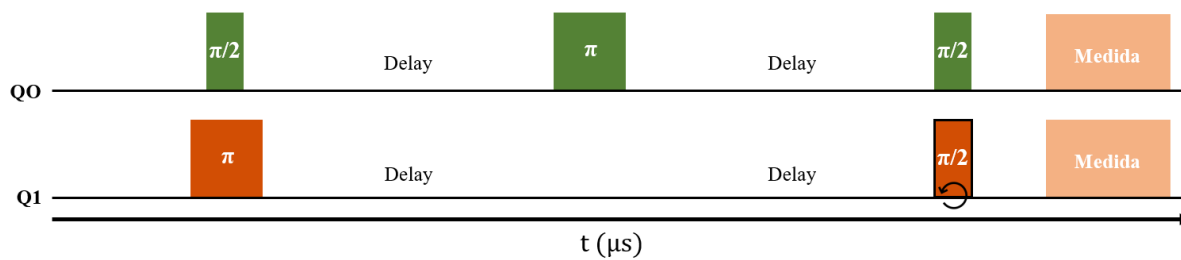


Figura 43: Representación de la secuencia para la medición en la base ZY.

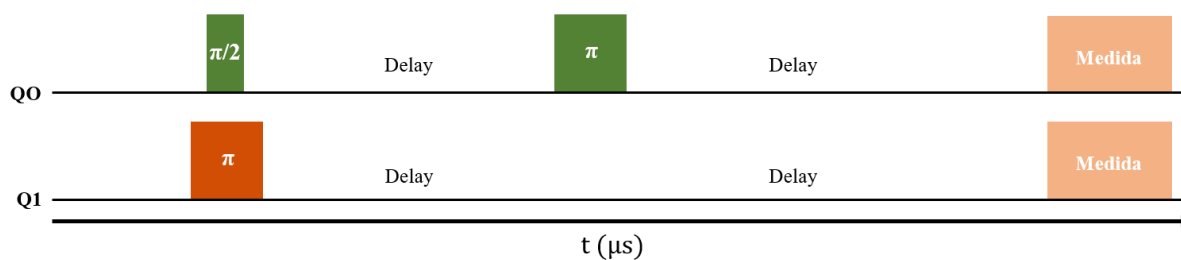


Figura 44: Representación de la secuencia para la medición en la base ZZ.

# 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este trabajo de investigación se ha estudiado la detección cuántica como una herramienta para medir señales o parámetros físicos, demostrando que es una técnica poderosa en la medición de señales electromagnéticas. A través de la secuencia de Ramsey y Hahn Echo, se ha logrado detectar la presencia de señales electromagnéticas a través de perturbaciones en los parámetros estudiados del qubit sensor. La naturaleza de estas perturbaciones ha sido estudiada, descartando en primera instancia el ruido electrónico y hallando mediante el estudio “Quantum State Tomography” que es el entrelazamiento cuántico el fenómeno responsable de estas.

Aunque este trabajo no se ha comparado con investigaciones previas, se han encontrado mejoras sobre los propios resultados, como el uso de la secuencia Hahn Echo en vez de Ramsey, permitiéndonos obtener una mayor sensibilidad en los experimentos. También se han realizado modificaciones en los qubits que actuaban como señal externa, como la alineación del pulso y su rotación, lo que ha permitido mejorar los resultados.

Es importante señalar que este estudio se ha realizado con qubits en un ordenador cuántico, lo que limita su aplicabilidad a casos más naturales. No obstante, estos resultados proporcionan una metodología para medir señales electromagnéticas con una mayor precisión y sensibilidad, lo que tiene un gran potencial para ser utilizado en una variedad de aplicaciones en el campo de la medición y detección de señales. Por ejemplo, en medicina, se puede aplicar la detección cuántica para detectar biomoléculas, lo que puede ser útil en la búsqueda de soluciones a enfermedades. En astronomía, la detección de partículas también puede ser llevada a cabo mediante estas técnicas, lo que permitiría la detección de partículas de alta energía, como los rayos cósmicos.

Las líneas futuras de investigación incluyen la implementación de nuevas técnicas para mejorar la sensibilidad de los sensores en los experimentos, como el uso de Dynamical Decoupling, lo que permitiría la detección de señales aún más débiles. Además, también se pueden explorar nuevas aplicaciones de la detección cuántica en otros campos de la ciencia y tecnología, como la detección de partículas en la industria de materiales o la detección de ondas gravitacionales en la física teórica.

En definitiva, este trabajo de investigación contribuye al avance de la detección cuántica y sienta las bases de una metodología para su aplicación en distintos campos de la ciencia y tecnología. Se espera que las investigaciones futuras continúen explorando y mejorando estas técnicas, lo que permitiría avances significativos en la medición y detección de señales.

# Bibliografía

- [1] E. Brüning, H. Mäkelä, A. Messina, and F. Petruccione. Parametrizations of density matrices. *Journal of Modern Optics*, 59(1):1–20, 2012.
- [2] Qiskit Community. Calibrating qubits using qiskit pulse, 2021.
- [3] C. L. Degen, F. Reinhard, and P. Cappellaro. Quantum sensing. *Rev. Mod. Phys.*, 89:035002, Jul 2017.
- [4] IBM. Ibm quantum experience.
- [5] QuIC Seminar. Qubit t1 experiment. Youtube, 2019.
- [6] QuIC Seminar. Ramsey experiment. Youtube, 2019.
- [7] QuIC Seminar. Spin echo experiment. Youtube, 2019.
- [8] thePIRL. How mri works - part 2 - the spin echo. Youtube, 2016.
- [9] Wikipedia. Esfera de bloch, 2023.