



**UBA**  
1821 Universidad  
de Buenos Aires

**.UBA**ECONÓMICAS  
FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS



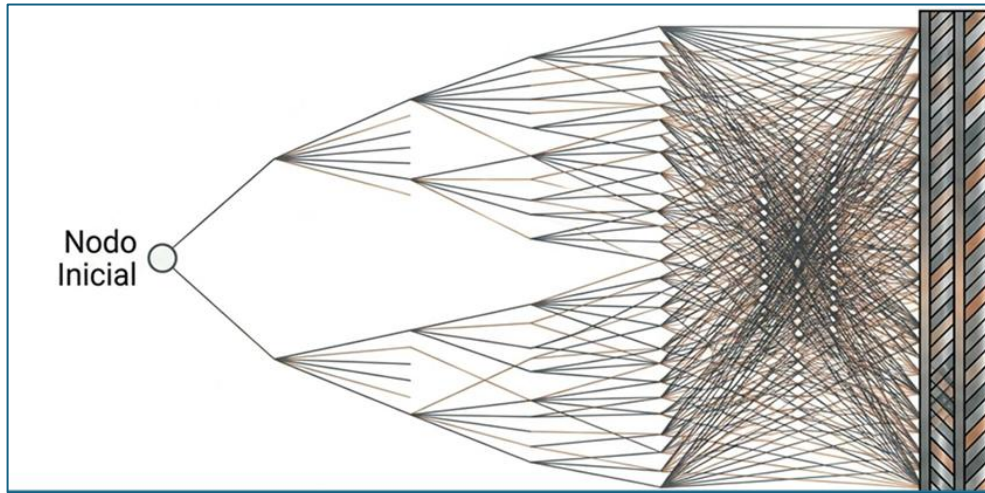
**Universidad de Buenos Aires - Facultad de Ciencias Económicas**

***El Impacto de la Computación Cuántica en las Finanzas***

**Dra. Rita Beatriz Morrone**

# Finanzas cuánticas

Su objeto es **aplicar los principios de la mecánica cuántica** y de la información cuántica para **resolver problemas financieros complejos** que superan la capacidad del procesamiento digital clásico.



*Si se pretende almacenar información en la memoria acerca del estado del sistema, se requiere un orden de  $2^N$  números complejos. Para este problema, cualquier simulación numérica requiere recursos que aumentan de forma exponencial.*

*Las computadoras cuánticas permiten abordar problemas de gran dimensionalidad para los cuales el cómputo clásico ofrece rendimientos decrecientes aplicando diferentes principios:*

**superposición**

Evaluación de múltiples escenarios simultáneamente

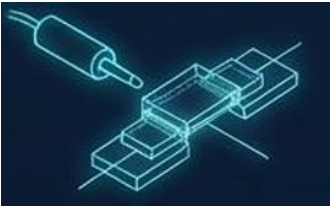
**entrelazamiento**

Modelado de correlaciones complejas

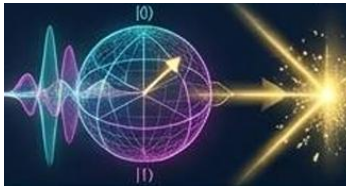
**interferencia**

Amplificado de caminos correctos y cancelación de erróneos con rápida convergencia

# Computación Clásica versus Computación Cuántica



| Bit Clásico (Computación Tradicional)                                                  | Qubit (Computación Cuántica)                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Representa un estado determinista y binario: 0 o 1 de manera estrictamente excluyente. | Existe en una superposición lineal continua de estados: $\alpha 0\rangle + \beta 1\rangle$ , representando múltiples posibilidades. |
| Un interruptor ordinario de dos posiciones (encendido/apagado).                        | Una esfera tridimensional interactiva (Esfera de Bloch) donde el estado es un vector continuo de radio 1.                           |
| Almacena exactamente 1 bit exacto a la vez.                                            | Codifica amplitudes complejas continuas y correlaciones cuánticas hasta que el sistema es medido.                                   |
| Lectura pasiva. El estado del bit se lee sin alterar su valor físico original.         | Colapso de estado. El acto de medir obliga al qubit a colapsar de forma probabilística a $ 0\rangle$ o $ 1\rangle$ .                |



Un qubit no se restringe a encontrarse en un estado único, sino que su condición más general es la superposición coherente,  $|\phi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ , donde las amplitudes complejas  $\alpha$  y  $\beta$  definen la probabilidad de medir cada estado. Consecuentemente, un sistema de qubits define un espacio de Hilbert de dimensión  $2^N$ , lo que faculta al hardware para representar y procesar simultáneamente una cantidad masiva de estados que excede la capacidad de las memorias digitales tradicionales.

# La Fase del Qubit Define la Interferencia sobre la Esfera de Bloch

## El Espacio de Hilbert

### LÓGICA COMPLEJA DE DOS DIMENSIONES

El estado físico de un qubit se describe con un vector en un espacio vectorial complejo bidimensional.

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son amplitudes de probabilidad complejas. Las probabilidades de colapso están sujetas a la regla de normalización física:

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

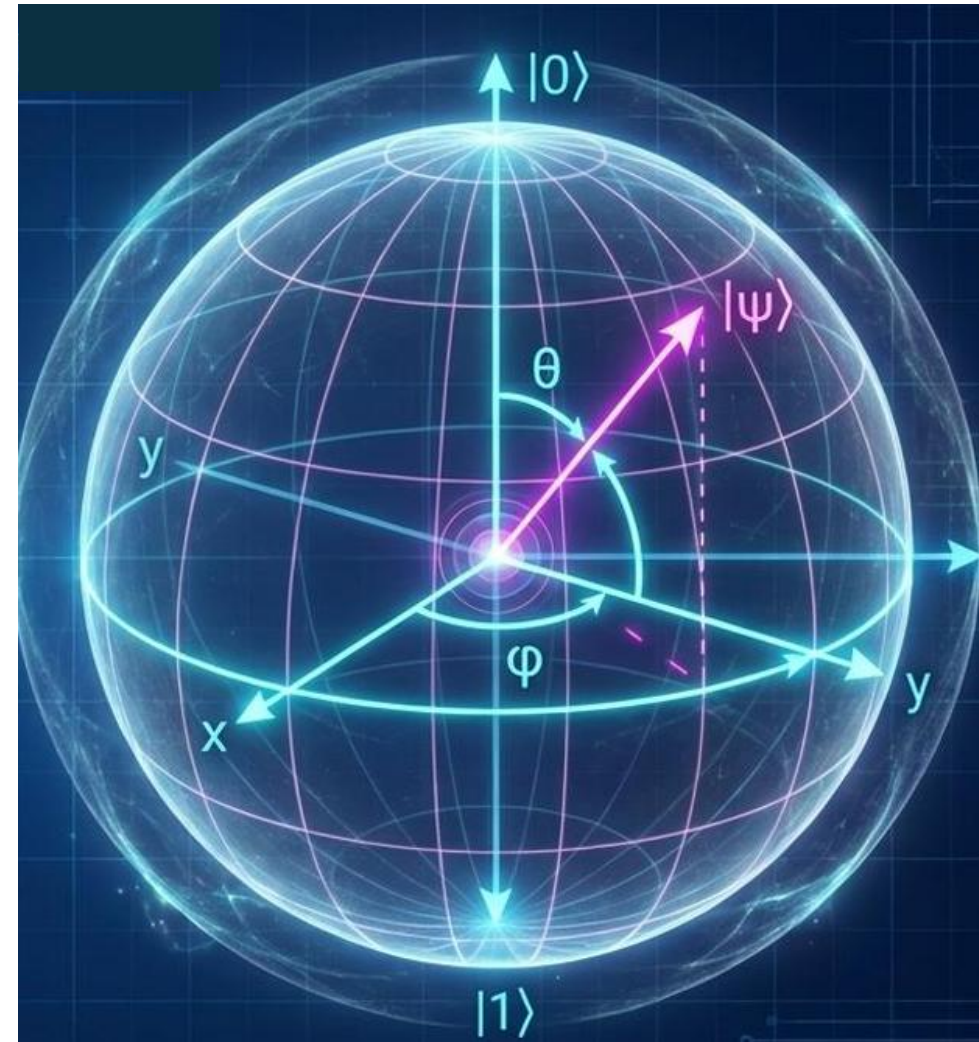
## La Esfera de Bloch

### GEOMETRÍA Y FASE CUÁNTICA

Cada estado puro del qubit se representa como un punto en la superficie de una esfera tridimensional de radio 1.

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

Donde el ángulo polar  $\theta$  define las probabilidades relativas de medición, y el ángulo azimutal  $\phi$  representa la fase cuántica (la base de la interferencia).



# Las Transacciones Financieras Actúan como Medición y Colapsan el Valor

## 1. Superposición

### NUBE DE PROBABILIDAD

El valor financiero no es un número estático y preexistente. Es intrínsecamente difuso e indeterminado.

El libro de órdenes ('order book') representa una superposición de valoraciones y propensiones subjetivas de mercado.



## 2. Medición

### LA TRANSACCIÓN

El acto de casar una orden de compra y venta física actúa como un proceso de medición cuántica.

Es la interacción activa de agentes lo que altera el sistema y colapsa la incertidumbre en un valor objetivo.



## 3. Colapso

### EL PRECIO DE MERCADO

Al transaccionar, la función de onda de propensión colapsa de forma instantánea en un precio histórico único e inmutable.

'Los experimentos que no se realizan, no tienen resultados': un activo no tiene precio real si no se intercambia.

El proceso de cómputo concluye con la medición, que colapsa el estado de superposición hacia un autoestado de la base computacional, introduciendo un indeterminismo fundamental donde la respuesta se extrae estadísticamente siguiendo la regla de Born.

***“ la probabilidad de obtener un resultado determinado al medir un observable es igual al módulo al cuadrado de la proyección del estado del sistema sobre el autoestado correspondiente”.***

Permite interpretar el cuadrado de la función de onda como una densidad de probabilidad para encontrar al sistema en una configuración específica.

# Conceptos de la mecánica cuántica aplicados a finanzas

## Cuantización de estados financieros y dualidad onda-partícula

### El Átomo

Confina electrones en niveles discretos de energía ( $n=1, 2, 3$ ). (Neamen, 2012).



### Cuantización del Dinero

El dinero confina el valor social en unidades indivisibles (centavos, transacciones). A nivel micro, la economía es 'digital'; el dinero no fluye, 'salta'.



### La Luz

Comportamiento de onda y radiación continua (dualidad onda-partícula).



### La Dualidad del Valor

El dinero resuelve el dilema entre el objeto físico finito y el crédito virtual ilimitado, propagándose por la economía como una onda de probabilidad.



El dinero funciona como una tecnología social cuántica similar a como se comporta la luz.

El valor financiero se propaga por la economía como una **onda de probabilidad**. Integra su naturaleza tangible e intangible, permitiendo que el valor exista en un estado de potencialidad (onda) antes de concretarse en una posición física (partícula).

# El Mercado Vibra y Cuantiza su Energía como un Oscilador Armónico

La **ecuación de Schrödinger** describe *cómo* evoluciona el valor en el tiempo y el **postulado de Born** nos dice *dónde* es más probable que ocurra una transacción nos falta definir el motor que impulsa ese movimiento: el **Hamiltoniano ( $H^\wedge$ )**

$$E_{op} = j \hbar \frac{\partial}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x, t) = \mathcal{H}$$



$$\mathcal{H} \Psi(x, t) = j \hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t)$$

En el mercado, ese motor no es el calor, sino la interacción dinámica entre la **oferta y la demanda**. Para modelar esta fuerza con rigor, recurrimos al **Oscilador Armónico Cuántico**. Este modelo transforma el 'equilibrio estático' de la economía clásica en un **equilibrio vibratorio**, donde el precio oscila alrededor de una zona de máxima propensión y la actividad transaccional se organiza en **niveles de energía discretos**

**Energía Cinética ( $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$ ):** Representa el **Momentum o Tendencia** del mercado (oferta y demanda activa).

**Energía Potencial ( $V$ ):** Representa el **Valor Fundamental o Sentimiento** (noticias y expectativas). Mientras en física la ecuación describe electrones en un cristal, en finanzas modela cómo la nube de valor evoluciona antes de una transacción.

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + \frac{1}{2}m\omega^2\hat{x}^2.$$

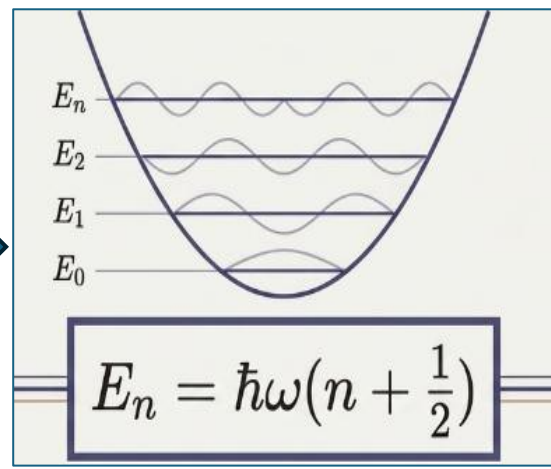


$$H = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2}m\omega^2x^2$$

El Hamiltoniano del Oscilador Armónico Cuántico (OAC) describe la energía total de un sistema sujeto a una fuerza restauradora. Rige la dinámica de partículas confinadas en un pozo de potencial (Neamen, 2012).

## La Cuantización de la Energía

La solución de la ecuación de Schrödinger dicta que la energía no fluye, sino que existe en estados discretos dictados por el número cuántico  $n$ .



$$m = \frac{\hbar}{2\omega\sigma^2}$$

|                                         |                                                                                          |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variable Física:<br><b>Masa (m)</b>     | Inercia mecánica. Estrecha el pozo de potencial y resiste perturbaciones (Neamen, 2012). |
| Variable Financiera:<br><b>Liquidez</b> | Inercia de mercado. Amortigua la volatilidad y absorbe transacciones.                    |

El mercado nunca está en "cero absoluto". La incertidumbre inherente, o energía de punto cero, se manifiesta en el *bid-ask spread* ("ruido base"). Los precios nunca están quietos; vibran por la propia naturaleza del sistema.



Estados excitados: alta frecuencia/volumen de transacciones

Salto de energía: la volatilidad y el alto volumen de operaciones equivalen a saltos a niveles excitados

Estado base: Fluctuación e incertidumbre (Spread)

A mayor masa cuántica (liquidez), se requiere una inyección mayor de energía para alterar el precio.

Así como el átomo confina a los electrones en capas de energía fijas, el sistema monetario confina el valor social en niveles discretos de transacciones. El mercado no es un equilibrio estático, sino un oscilador que vibra con una energía base de incertidumbre incluso en su punto de mayor calma

# Fijar un Precio Exacto Elimina la Información de la Tendencia Futura

## Incertidumbre de Heisenberg

### LA PRECISIÓN FORZADA

El mercado financiero opera bajo una balanza fundamental e infranqueable de precisión:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar / 2$$

Cuanta más precisión se exige para fijar un precio actual exacto ( $\Delta x \rightarrow 0$ ), más información se pierde sobre su tendencia de momentum futuro ( $\Delta p \rightarrow \infty$ ). El mercado opera en una dualidad entre precisión e información.

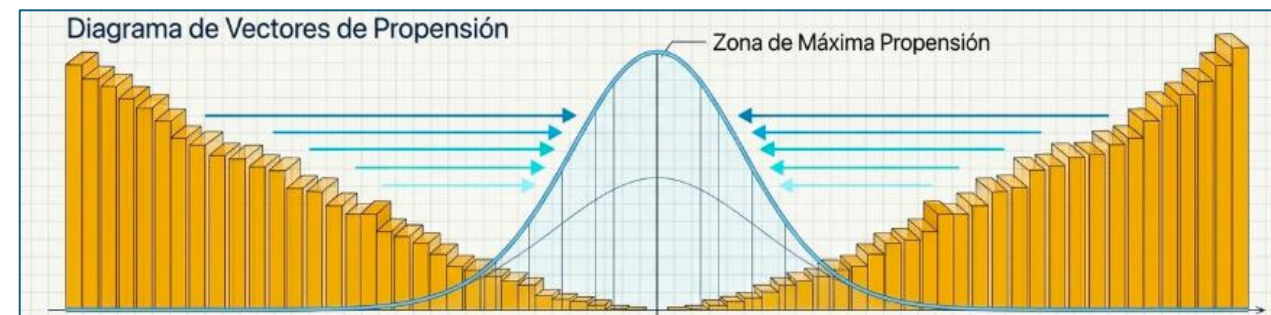
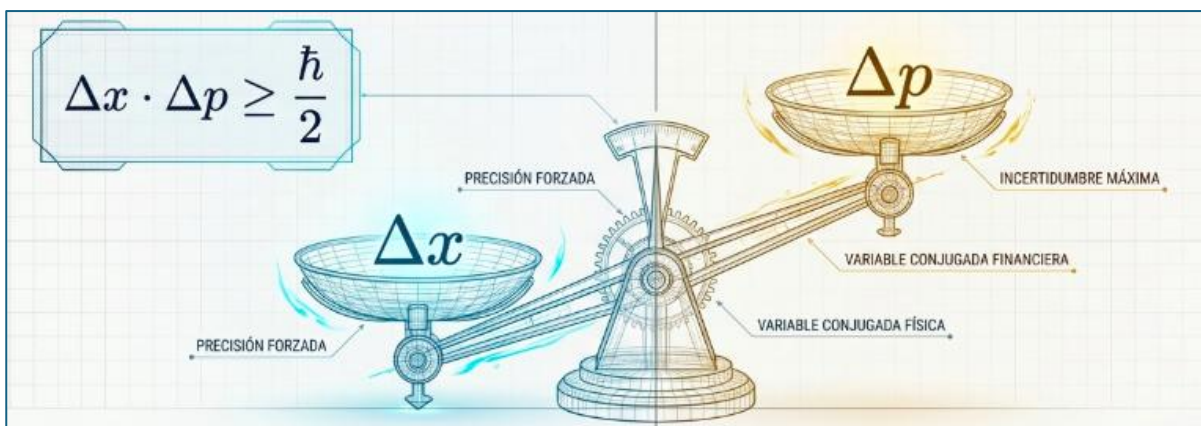
## La Fuerza Entrópica

### GRADIENTES DE PROPENSIÓN

Los sistemas financieros tienden a evolucionar hacia los estados estadísticamente más probables (Máxima Entropía).

$$F(x) = \gamma \cdot P'(x) / P(x)$$

Donde  $P(x)$  representa la función de propensión a transaccionar, y  $\gamma$  representa el 'calor informativo' o nivel de ruido del sistema. Si  $\gamma$  es alto, el mercado está 'caliente' y los precios fluctúan con más energía.



**Cuando compradores y vendedores alinean sus visiones, la volatilidad se reduce, la entropía se minimiza y el sistema se vuelve más "ordenado" e informativo.**

# Superposición y Entrelazamiento aplicados a Activos Contingentes

En mecánica cuántica, antes de una medición, el sistema no se encuentra en un estado definido, sino en una **superposición lineal** de todos los autoestados posibles

$$|\Psi\rangle = \sum_n c_n |\psi_n\rangle$$

La probabilidad de encontrar la partícula en una posición  $x$  viene dada por la densidad de probabilidad  $P(x, t) = |\psi(x, t)|^2$ , donde la integral de la probabilidad en todo el espacio debe ser igual a 1

Antes de la medición, el sistema existe en una superposición de todos los estados.



El valor intrínseco es una ilusión; el valor es una nube difusa de posibilidades (el order book).

La transacción equivale a la medición cuántica: colapsa la nube de probabilidades en un precio histórico único.



El mercado no "descubre" un precio preexistente; el acto de la **transacción** equivale a la medición cuántica, obligando a la función de onda de propensión a colapsar en un número objetivo único (precio histórico)

Una opción financiera es el ejemplo supremo de superposición cuántica; posee múltiples estados de valor potenciales que solo se concretan ("colapsan") en el momento del ejercicio o vencimiento

Se dice que dos sistemas están **entrelazados** si su estado conjunto no puede describirse como el producto de sus partes individuales

$$|\Psi\rangle \neq |\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle$$

Estados no factorizables:

$$|\Psi_{AB}\rangle \neq |\Psi_A\rangle \otimes |\Psi_B\rangle$$

Dos partículas comparten una única función de onda, permitiendo acción a distancia.

La deuda es el entrelazamiento cuántico de las finanzas.

El default de un deudor altera instantáneamente la realidad financiera del acreedor, sin importar la distancia física. Causa raíz del contagio sistémico.



El ejemplo clásico es el **Estado de Espín Singlete**:

$$|S\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\uparrow\rangle|2\downarrow\rangle - |1\downarrow\rangle|2\uparrow\rangle)$$

Esto implica que la medición de una partícula determina instantáneamente el estado de la otra, sin importar la distancia ("acción fantasmal a distancia")

# ¿Qué tipo de problemas financieros reales se pueden abordar hoy con algoritmos cuánticos?

Aunque la tecnología se encuentra en la **era NISQ** (procesadores con ruido que aún no alcanzan una ventaja cuántica absoluta en producción), actualmente se programan y ejecutan **enfoques híbridos clásico-cuánticos** aplicados a:

- ❖ Optimización de carteras multiactivo
- ❖ Valuación de derivados y opciones – con simulaciones Monte Carlo cuántico
- ❖ Medición avanzada del riesgo de mercado mediante el cálculo del VaR (Valor en Riesgo) y TVaR con colas extremas en tiempo real .
- ❖ Detección de fraudes, prevención de anomalías y predicción de series temporales en tiempo real mediante Aprendizaje Automático Cuántico (QML).
- ❖ Criptografía. Post – quantum security : amenaza para bancos.

# Optimización de carteras multiactivo

El modelo tradicional de Markowitz (optimización de media-varianza) se vuelve un problema NP-duro al incorporar restricciones del mundo real (lotes discretos, cardinalidad máxima, límites de exposición).

Problema de Markowitz (MVO):  
Riesgo vs. Retorno.

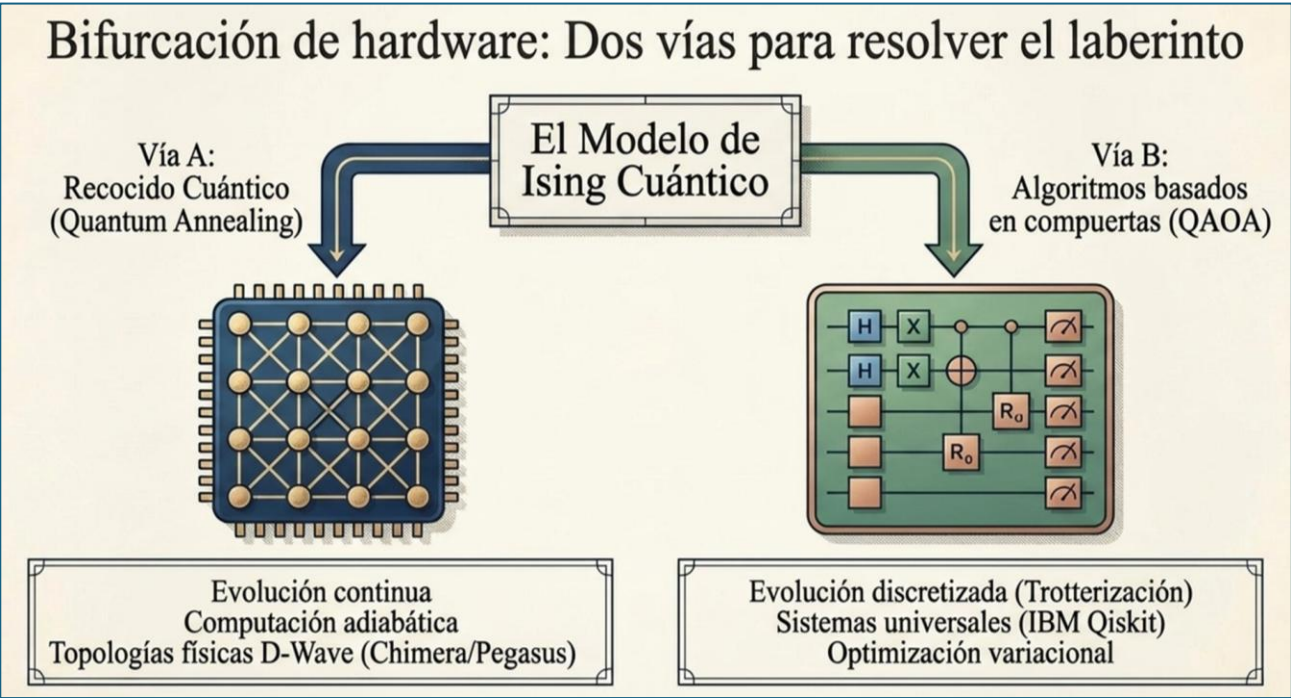
$N$  activos =  $2^N$  carteras posibles.

Los algoritmos clásicos deben evaluar iterativamente estas combinaciones, lo que hace imposible escalar el descubrimiento del mínimo global absoluto en tiempos prácticos.

## La ventaja cuántica

- 1. Superposición y Entrelazamiento
- 2. Efecto Túnel Cuántico

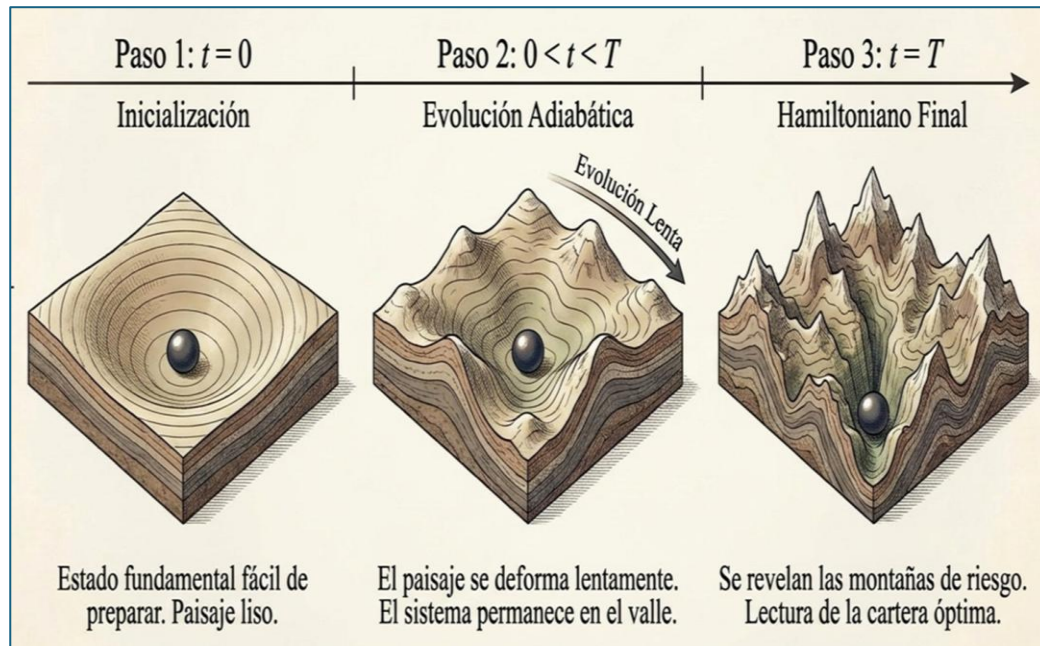
*La principal ventaja del recocido cuántico es su escalabilidad: puede manejar problemas con numerosas variables, aunque la precisión de la solución puede verse afectada por el ruido y las limitaciones de conectividad del hardware*



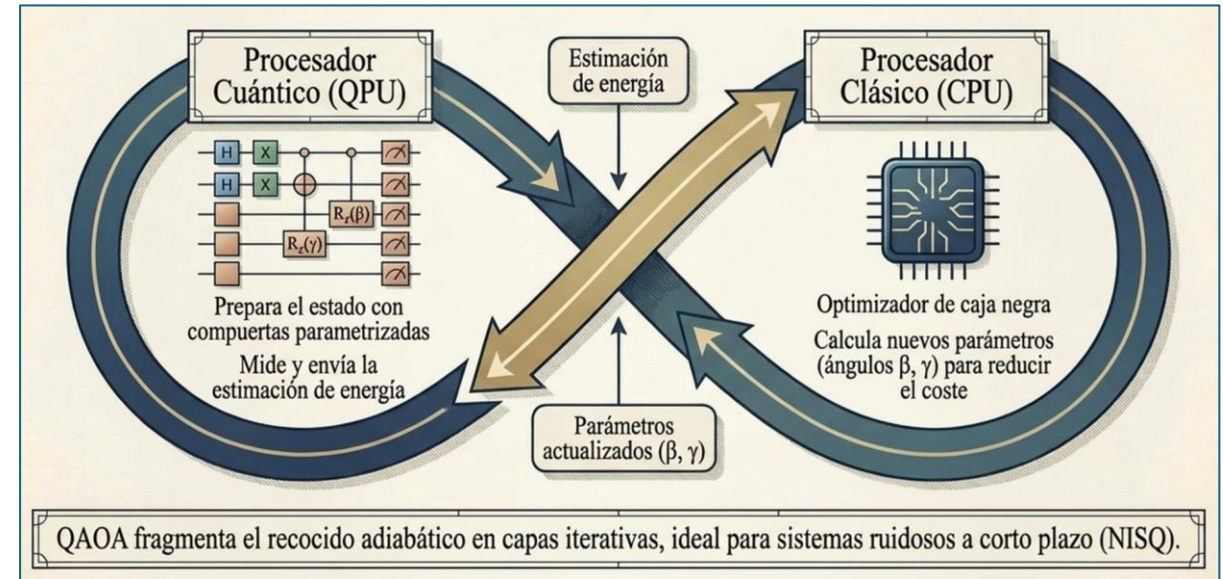
*La principal ventaja es su flexibilidad: al ejecutarse en hardware universal, puede implementar corrección de errores y circuitos más complejos. Sin embargo, su escalabilidad está limitada por el número de qubits disponibles y la profundidad del circuito que puede tolerarse antes de que el ruido degrade la señal*

*Para comprender las metodologías de D-Wave e IBM (Qiskit), es fundamental entender que ambas buscan identificar el estado fundamental (mínima energía) de un Hamiltoniano de problema, pero lo hacen mediante procesos físicos y lógicos distintos*

## Recocido Cuántico (Quantum Annealing)



## Algoritmo de Optimización Aproximada Cuántica (QAOA)



# Reflexiones: Eficiencia híbrida y la realidad de la era NISQ

**El Reto NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum):** El hardware cuántico actual sufre de ruido térmico, decoherencia y conectividad limitada entre qubits. La optimización cuántica "pura" para cientos de activos aún no es viable de forma aislada.

|                                   | Modelo Clásico<br>(Fuerza Bruta/Heurística)            | Modelo Cuántico Puro                                           | Modelo Híbrido Actual<br>(QPU + CPU)                     |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Escalabilidad Combinatoria        | ⚠ Limitada exponencialmente (solo para pocos activos). | ⚠ Teóricamente superior, pero limitado por tamaño de hardware. | ✓ Eficiente para grandes problemas (cientos de activos). |
| Tolerancia al Ruido (NISQ)        | ✓ Robusto (no afectado por ruido cuántico).            | ✗ Muy sensible, requiere corrección de errores avanzada.       | ✓ Alta (la parte clásica no se ve afectada).             |
| Asignación Continua y Riesgo Fino | ✓ Óptimo para valores continuos.                       | ✗ Difícil, orientado a selección binaria.                      | ✓ Óptimo (CPU maneja lo continuo).                       |

**La Solución Práctica:** Los modelos híbridos dividen el trabajo de manera óptima.

**Selección (Cuántica):** Algoritmos cuánticos resuelven la parte NP-dura (selección binaria de activos).

**Asignación (Clásica):** Algoritmos clásicos convexos asumen la asignación de pesos fraccionales (Bouland et al., 2020).

# Aprendizaje Automático Cuántico (QML).

---

Clasificación de regímenes para detectar mercados bull, bear, utilizando Quantum SVM

Detección de anomalías para identificar fraude o manipulación de mercado con Quantum Autoencoders

Redes neuronales cuánticas (QNN) para modelar volatilidad estocástica

## Incrustación de Características (Feature Maps)

### QSVM Y MODELOS DE KERNEL CUÁNTICO

Los algoritmos como los clasificadores cuánticos de vectores de soporte QSVM mapean datos clásicos de transacciones financieras a un espacio de Hilbert de dimensiones complejas mediante mapas de características cuánticas (feature maps) como ZZFeatureMap.

Esto permite calcular el producto interno de estados cuánticos como métrica de distancia, revelando patrones de fraude invisibles para algoritmos clásicos y previniendo el sobreajuste (overfitting).

## Resultados Empíricos Reales

### ESTUDIOS DE IBM CON DATOS TRANSACCIONALES

En estudios con 2.4 millones de transacciones reales (Grossi et al., 2022), el clasificador cuántico QSVM demostró una precisión del 78%, superando en un 2% a XGBoost y Random Forest clásicos.

Modelos de un solo qubit con recarga de datos (data reloading) permiten empaquetar funciones complejas en los grados de libertad de las compuertas de rotación, ideal para dispositivos NISQ.

# Monte Carlo Cuántico acelera la valoración de derivados y medición de riesgo

Valorar un derivado con 10 factores de riesgo podría requerir  $10^6$  simulaciones en Montecarlo clásico



## Aceleración Cuadrática en Pricing

### ESTIMACIÓN DE AMPLITUD CUÁNTICA (QAE)

El algoritmo para Monte Carlo cuántico ofrece una aceleración cuadrática, requiriendo  $O(1/\epsilon)$  pasos para estimar expectativas de mercado frente al clásico  $O(1/\epsilon^2)$ .

Permite el pricing eficiente de opciones complejas (barreras, Bermudas mediante interpolación de Chebyshev y QAE) codificando las funciones de pago (*payoffs*) directamente en las amplitudes de probabilidad de los qubits.

VaR clásico asume distribuciones normales  
No captura eventos de cola real  
Los escenarios de stress son manuales  
El cómputo de TVaR es costoso.



## Cálculo de Riesgo

### VALOR EN RIESGO (VaR) Y CVaR

La integración de QAE permite la estimación ultraeficiente de pérdidas extremas como el Valor en Riesgo (VaR) y el Valor en Riesgo Condicional (CVaR) en carteras de crédito y de bonos.

Modelos de factores de riesgo sistémico de múltiples variables se simulan en la QPU, facilitando la generación de escenarios de estrés en tiempo real (Matsakos & Nield, 2023).

Distribuciones de cola gruesa en tiempo real.  
Generación automática de escenarios extremos. Integración con datos de alta frecuencia

# Criptografía y Blockchain se blindan ante la amenaza del algoritmo de Shor

## La Amenaza del Algoritmo de Shor

### RUPTURA DE CRIPTOGRAFÍA ASIMÉTRICA

El algoritmo de Shor es capaz de factorizar enteros y resolver logaritmos discretos en tiempo polinomial  $O(L^3)$ , comprometiendo la seguridad de RSA y ECDSA en redes bancarias y blockchains.

Aproximadamente 4,096 qubits lógicos estables serían suficientes para romper una clave RSA de 2,048 bits, amenazando la integridad de firmas y wallets digitales de criptomonedas.

## Soluciones y Blockchain Post-Cuántico

### CRYPTOGRAFÍA BASADA EN REDES Y FIRMAS

Migración activa hacia la Criptografía Post-Cuántica (PQC) estandarizada por el NIST (CRYSTALS-Kyber para llaves y CRYSTALS-Dilithium para firmas digitales resistentes en blockchains).

Redes de criptomonedas de vanguardia (como QRL o Nexus) ya integran firmas resistentes (XMSS) para salvaguardar activos contra la interceptación y el robo de claves (Naik et al., 2025).

## ¿En qué áreas del sector financiero se está demandando este conocimiento?

Las principales instituciones financieras internacionales (como JPMorgan Chase, Goldman Sachs, HSBC y BBVA) ya han conformado equipos especializados en articulación con proveedores tecnológicos.

La demanda de talento híbrido se concentra en:

- ✓ Áreas de **investigación cuantitativa, gestión de riesgos, trading algorítmico y tesorería** de bancos, fondos de inversión y aseguradoras.
- ✓ Equipos de **Investigación y Desarrollo (I+D)** en tecnologías cuánticas y empresas FinTech.
- ✓ **Consultorías especializadas** en innovación tecnológica y diseño de estrategias de seguridad post-cuántica.
- ✓ **Organismos reguladores** y de supervisión del sistema financiero.
- ✓ **Ámbitos académicos** y producción científica en este campo emergente.

# Introducción a las finanzas cuánticas

## Equipo docente



**Al Mussawi Nouman**

Dr. en Ciencias Económicas – Subárea Finanzas – FCE UBA [CV](#)



**Milanesi Gastón**

Dr. en Ciencias de la Administración – UNS [in](#)



**Tapia Gustavo**

Posdoctorado – Subárea Administración – FCE UBA [in](#)



**Del Rosso Rodrigo**

Dr. en Ciencias Económicas – Subárea Actuarial – FCE UBA [in](#)



**Morrone Rita**

Dra. en Ciencias Económicas – Subárea Finanzas – FCE UBA [in](#)



**García Fronti Javier**

Dr. en Ciencias Económicas – FCE UBA [in](#)



**Sarto Daniel**

Actuario – FCE UBA [in](#)