ES_52: Podemos construir máquinas cuánticas con electrónica convencional

Computar mediante relaciones sin conocer el valor hasta la medida

Víctor Estrada Díaz
Einstein-VED --- UNIHOLOG

Documentos adicionales del proyecto: Láminas de construcción y comparación Q-V · Traductores y compiladores de V · Presentación a la comunidad · Índice completo de recursos · Relaciones, medida y Bell.

Premisas de la comparación y de la demostración

$D_{PROTOCOLO}$ — Protocolo y alcance de la comparación operacional.

La hipótesis de este trabajo es que existe una máquina física V, construible con electrónica convencional, operacionalmente equivalente a una máquina cuántica Q en el modelo computacional considerado. La comparación se regirá desde el principio por las siguientes premisas.

1. Simetría estricta del criterio. Q y V deben someterse al mismo protocolo operacional y a las mismas restricciones. No se exigirá a V un criterio que no se sostenga también para Q, ni se concederá a V una información o un recurso que no esté permitido a Q. Esta regla se aplica recíprocamente a ambas máquinas.

2. Correspondencia explícita de las condiciones. En cada comparación se definirán las preparaciones, entradas, transformaciones, configuraciones de medida e instantes de lectura correspondientes. Las realizaciones físicas pueden ser distintas: lo que debe coincidir es el protocolo operacional que se compara. Las condiciones ambientales y de funcionamiento de cada realización se declararán, sin exigir componentes idénticos.

3. Igualdad de acceso a la información. Si el protocolo no observa los valores internos de Q durante el cálculo, tampoco exigirá observar los de V. No se atribuirán resultados observados a medidas no realizadas en ninguna de las dos máquinas. Las condiciones de comunicación, control, sincronización y elección de las medidas se explicitarán para ambas. Esta restricción de acceso no presupone la naturaleza del estado físico de ninguna de ellas ni demuestra por sí sola su equivalencia.

4. Distinción entre predicción y resultado. P representa la probabilidad prevista de obtener una salida; q y v representan los valores registrados al medir Q y V, respectivamente. Para una lectura binaria en t = to:

$$q = M_Q(t_0) \in \{0,1\}, \qquad v = M_V(t_0) \in \{0,1\}\,.$$

Notación común desde el inicio. Adoptamos ξ (xi) para indicar que el resultado de una lectura binaria todavía no ha sido observado. Es una convención de este documento, aplicada con idéntico significado a Q y V, no un símbolo universal de la mecánica cuántica. Escribimos $K(A) = \xi$ para expresar nuestro conocimiento del resultado asociado a A, no una asignación del valor físico $A = \xi$. En las expresiones $K(Q(t))$ y $K(V(t))$ hablamos del resultado de la lectura especificada por el protocolo, no del conocimiento completo del estado de la máquina.

Al realizar esa lectura en $t = t_0$, se registra $b \in \{0, 1\}$. Las flechas que parten de ξ son esquemas de observación y conocimiento, no ecuaciones de evolución del estado físico. Reservamos ψ para la descripción del estado cuando el modelo la utilice; conocer ese estado no equivale a conocer el resultado de una ejecución antes de medir. Compartir ξ no presupone que Q y V tengan la misma dinámica o distribución. Los pares de predicciones que se muestran en los contrastes señalan las dos cantidades cuya igualdad debe comprobarse; no afirman su igualdad.

Convenciones de escritura de las fórmulas. Para que las expresiones sean legibles por el compilador de PUBLICAR, col(a,b) designa el vector columna de componentes a y b; mat((a,b),(c,d)) designa la matriz cuyas filas son (a,b) y (c,d). Si las entradas son bloques, se trata de la correspondiente matriz por bloques, con las dimensiones compatibles declaradas en cada modelo. norm(z) es la norma euclídea, o la norma hermítica del vector complejo. ket(psi) designa el mismo vector de estado que la notación de Dirac; e_0 y e_1 son los vectores de la base de lectura, y e_j es el vector de esa base con índice j en un registro mayor. Estas convenciones no cambian las operaciones ni sus realizaciones físicas.

En P(a,c_{\mathrm{protocolo}}), P(a,b,x,y) y expresiones análogas, los últimos argumentos son las condiciones del protocolo: estas funciones representan probabilidades condicionadas, no probabilidades conjuntas con los controles. La misma convención se aplica a F para frecuencias. Uniforme(0,1) designa la distribución uniforme de referencia con soporte de preparación 0 menor o igual que r y r menor que 1; no añade masa puntual en los extremos. phys(Q) y phys(V) identifican las realizaciones físicas, no sus salidas. Las cadenas de relaciones se escriben como mapas sucesivos; cuando se especifica T_j, la recurrencia R_j = T_j(R_{j-1}) conserva cada paso. Para bits A y B del dominio {0,1}, la puerta NOT se escribe B = 1 - A. Esto expresa su tabla de verdad, no una negación de proposiciones. La marca post identifica el estado posterior a una medida, no una potencia. c_protocolo es la configuración del protocolo, distinta de una matriz C o de un puerto binario C. Los diagramas de lectura muestran el paso del resultado no observado al resultado b perteneciente a {0,1}; la flecha no es una evolución de xi como si fuese un valor físico.

El símbolo ξ no constituye un tercer valor almacenado ni fija probabilidades: estas se derivan de la preparación y de las operaciones. Una vez registrada una salida, esa ejecución tiene un resultado conocido; las probabilidades describen las predicciones y las frecuencias esperadas en repeticiones del protocolo. Su dominio general es [0,1], incluidos los casos de certeza e imposibilidad.

5. Exposición completa de cada equivalencia. Para cada operación se presentarán su definición en Q, su realización propuesta en V, la correspondencia entre ambas y la justificación de sus resultados. Se distinguirán las premisas asumidas, las identidades matemáticas derivadas, las reglas físicas de lectura y los resultados experimentales disponibles. Las reglas de predicción y medida empleadas para Q y V deberán quedar explícitas; la igualdad buscada no se introducirá como una premisa.

6. Criterio observable común. Para un protocolo C con salidas correspondientes a, la equivalencia exige:

$$P_V(a, c_{\text{protocolo}}) = P_Q(a, c_{\text{protocolo}}).$$

Las comparaciones experimentales usarán criterios estadísticos comunes, un número de repeticiones declarado y tolerancias justificadas. Coincidir en un resultado aislado o en una distribución marginal no establece por sí solo la igualdad de todas las correlaciones ni de todos los protocolos.

7. Alcance y composición. El modelo Q de referencia y los protocolos admitidos se especificarán. Para establecer equivalencia completa en ese modelo habrá que justificar las operaciones elementales, su composición, las medidas admitidas y la extensión a varias unidades. Una equivalencia parcial se identificará como tal. La equivalencia de resultados y una eventual ventaja de recursos se evaluarán por separado.

La simetría de las condiciones es el punto de partida de la demostración; la equivalencia operacional completa V = Q es la hipótesis que debe establecerse mediante el desarrollo.

Resumen

$D_{HIPOTESISV}$ — Hipótesis de equivalencia física que se propone investigar, no un teorema obtenido ni una premisa que pueda darse por demostrada.

Este trabajo parte de una pregunta muy sencilla: ¿es imprescindible construir una máquina con componentes específicamente cuánticos para obtener el comportamiento computacional que buscamos en una máquina cuántica?

La hipótesis que desarrollo aquí es que no necesariamente.

Propongo una máquina, que denominaré **V**, construible mediante electrónica convencional, cuyo principio fundamental consiste en renunciar deliberadamente a conocer los valores internos durante el proceso de cálculo.

La máquina no almacena ξ.

$$\xi\text{:resultado binario no observado}.$$

Los valores continúan perteneciendo al dominio lógico:

$$\{0, 1\}.$$

Mientras no medimos, no conocemos cuál de ellos tenemos. Sin embargo, desconocer los valores no significa desconocer las **relaciones entre ellos**.

Podemos conocer, construir y transformar relaciones entre valores desconocidos. Podemos propagar esas relaciones, introducir retardos, fases, excitaciones, inhibiciones y composiciones sin realizar una medida intermedia.

Solamente cuando imponemos una medida en:

$$t = t_0$$

obtenemos necesariamente:

$$b \in \{0, 1\}.$$

La propuesta consiste en someter una máquina cuántica Q y una máquina convencional V exactamente a las mismas condiciones operacionales y estudiar si existe alguna operación observable de Q que V no pueda replicar.

V no pretende simular matemáticamente Q.

$$\text{V replica Q; no simula Q.}$$

Lo presentado es una hipótesis de trabajo y una invitación a estudiarla, discutirla, ampliarla, refutarla o construirla.

---

1. El origen de la idea

$P_{INVERSION}$ — Un inversor establece una relación entre entrada y salida sin exigir su lectura previa.

En un computador convencional queremos conocer y controlar los estados lógicos. Pero podemos construir físicamente un circuito convencional y **renunciar a conocer el valor que está recorriendo ese circuito**.

Un transistor no necesita que un observador conozca el valor sobre el que actúa. Una puerta NOT tampoco.

Si $K(A) = \xi$, podemos construir físicamente:

$$B = (1 - A)$$

sin medir previamente A. Entonces:

$$K(A) = \xi, \qquad K(B) = \xi,$$

pero conocemos:

$$A \neq B\,.$$

o:

$$A \oplus B = 1\,.$$

Podemos desconocer los valores y conocer las relaciones.

2. Qué significa ξ

$D_{DESCONOCIDO}$ — Notación epistemológica y dominio binario.

Escribiremos $K(A) = \xi$ cuando el valor de A sea desconocido.

$$\xi \text{ no es un valor}\,.$$

No estamos definiendo $\{0, 1, \xi\}$. El dominio lógico continúa siendo:

$$\{0, 1\}\,.$$

ξ no es un tercer estado lógico, un valor almacenado, una señal electrónica, una superposición que debamos implementar ni una variable oculta. Es nuestra notación para:

valor desconocido.

Podemos escribir $K(A) = \xi$ para hacer explícito que hablamos de nuestro conocimiento. La máquina no almacena ξ.

3. La medida

$D_{LECTURA}$ — Resultado registrado en el instante de observación.

Deps: D_DESCONOCIDO

Al observar A en $t = t_0$ realizamos $M(A, t_0)$ y:

$$M(A, t_0) \in \{0, 1\}.$$

Nunca $M(A, t_0) = \xi$. Por tanto:

$$\xi \mapsto b \in \{0, 1\}$$

expresa que antes desconocemos el valor y después conocemos el resultado.

4. El colapso entendido como medida

Hasta $t = t_0$ no conocemos el resultado. En $t = t_0$ medimos y obtenemos $b \in \{0, 1\}$.

Para este trabajo basta la consecuencia experimental:

antes de medir: resultado desconocido;

después de medir: resultado conocido.

5. Dos máquinas: Q y V

Usaremos Q para la máquina cuántica y V para la máquina VED.

> **No exigiremos a V una información que no exigimos a Q, ni atribuiremos a V un valor que no observamos en Q.**

Antes de medir:

$$K(Q(t)) = \xi, \qquad K(V(t)) = \xi.$$

Al medir:

$$M_Q(t_0) \in \{0, 1\}, \qquad M_V(t_0) \in \{0, 1\}.$$

Así:

$$Q{:}\xi \mapsto b \in \{0, 1\}$$

$$V{:}\xi \mapsto b \in \{0,1\}$$

6. Computar sin medir valores internos

La propuesta no consiste en ocultar al usuario una variable conocida internamente. Durante el cálculo no utilizamos la medida de los valores internos como condición necesaria para continuar.

Si:

$$K(A) = \xi, \qquad B = (1 - A), \qquad C = B, \qquad D = (1 - C),$$

podemos mantener desconocidos los valores individuales y conocer toda la estructura relacional. **La información computacional está en las relaciones.**

7. Computar relaciones

$D_{RELACIONES}$ — Transformaciones de relaciones sin observación intermedia.

Deps: D_PROTOCOLO, D_DESCONOCIDO

Representemos las relaciones por R. Podemos aplicar transformaciones:

$$R_j = T_j(R_{j-1}), \qquad j \in \{1, \ldots, n\}\,.$$

Mientras:

$$K(V_1) = \xi, K(V_2) = \xi, \ldots, K(V_n) = \xi\,.$$

El principio es:

transformar relaciones sin medir los valores relacionados.

8. Una operación física no necesita conocer su entrada

Para un inversor:

$$B = (1 - A)\,.$$

No necesita realizar primero $M(A)$. Por tanto:

$$\xi \mapsto \xi$$

no significa que nada haya sucedido: conocemos exactamente la relación $B = (1 - A)$, aunque A y B sean desconocidos.

9. La función temporal $f(t)$

D_{TIEMPO} — Evolución física e instante de lectura.

Deps: D_LECTURA, D_RELACIONES

Introducimos una evolución física $f(t)$. Puede describir la evolución de la máquina mientras:

$$K(V(t)) = \xi$$

y $R(t)$ evoluciona.

La medida selecciona $t = t_0$:

$$M(V(t_0)) \in \{0, 1\}\,.$$

El resultado binario procede de haber restringido esta primera V al modo lógico comparable con un qubit, no de que $f(t)$ sea binaria.

10. La neurona biológica como inspiración

Una posible V futura puede parecerse más a una neurona biológica: múltiples señales excitadoras e inhibidoras, pulsos, trenes temporales, retardos y realimentación.

Una unidad V podría incorporar:

$$\text{excitación}, \quad \text{inhibición}, \quad \text{retardo}, \quad \text{fase}, \quad \text{realimentación}\,.$$

Este trabajo establece primero el principio, no la construcción completa.

11. La fase ϕ

La fase debe tratarse simétricamente:

$$Q' = \Phi_\phi(Q), \qquad V' = \Phi_\phi(V)\,.$$

Aquí Phi_phi designa la operación de fase phi de cada modelo; no se presupone que sus realizaciones físicas sean iguales. Se conserva el control phi explícitamente, aun cuando el estado no haya sido observado.

Regla simétrica de ejecución y lectura. En este protocolo no se exige ni a Q ni a V determinar, medir ni exponer su fase interna antes de la medida en $t = t_0$. No se añade a V una lectura previa que no se pide a Q. Aplicar una transformación de fase no requiere leer previamente esa fase. El parámetro de una operación expresamente fijado como entrada no se confunde con un valor interno desconocido. Las operaciones se ejecutan sin lecturas intermedias; el latch registra conjuntamente los estados internos y externos en $t = t_0$. La referencia Q se consulta únicamente después de finalizar V.

Podemos conocer:

$$X' = T_\phi(X)$$

sin conocer X ni X':

$$K(X) = \xi, \qquad K(X') = \xi\,.$$

Por tanto:

$$\text{conocer la transformación} \neq \text{conocer el valor transformado}\,.$$

11.1. Amplitudes: definiciones independientes y criterio de comparación

$D_{AMPLITUDES}$ — Amplitudes Q y normalización de señales V.

Deps: D_PROTOCOLO, D_LECTURA

Para Q escribimos el estado puro de una unidad en la base de lectura:

$$\text{ket}\,(\psi_Q(t)) = \alpha_Q(t)e_0 + \beta_Q(t)e_1\,, \qquad |\,\alpha_Q|^2 + |\,\beta_Q|^2 = 1\,.$$

Para la realización de señales candidata de V, sean s0(t) y s1(t) las envolventes complejas de dos canales coherentes, descritas mediante componentes reales de amplitud y fase. No representan bits ya leídos. Si la potencia total p_norm = |s0|² + |s1|² es positiva, definimos:

$$\alpha_V = \frac{s_0}{\sqrt{p_{\text{norm}}}}, \qquad \beta_V = \frac{s_1}{\sqrt{p_{\text{norm}}}}\,.$$

La normalización da |αV|² + |βV|² = 1. Son amplitudes normalizadas de señales; llamarlas amplitudes de probabilidad requiere además una regla de lectura que conecte sus módulos cuadrados con las frecuencias de salidas binarias. Esa conexión se desarrolla en la sección 12.2. No se deduce únicamente del desconocimiento de los valores internos.

El símbolo ξ se reserva para el conocimiento de las salidas no leídas. Las expresiones de amplitud describen matemáticamente este modelo de señales; no son una orden de leer, estimar ni calcular los valores internos de una ejecución antes de $t = t_0$. Conocer la ley de una transformación no equivale a observar las señales sobre las que actúa. No se identifica una amplitud compleja con un resultado binario o con una probabilidad real.

El objetivo de comparación en este modelo de señales es:

$$\text{col}\,(\alpha_V(t), \beta_V(t)) = e^{i\gamma(t)}\ \text{col}\,(\alpha_Q(t), \beta_Q(t)),$$

con γ una fase global común a ambos canales. Esta correspondencia es un criterio suficiente para las operaciones y medidas del modelo, no una exigencia de que toda arquitectura V tenga esos mismos estados internos. La hipótesis no se introduce como resultado: se comprueba mediante las ecuaciones de evolución y las condiciones iniciales.

11.2. Evolución temporal de Q y de una realización V candidata

Para una Q ideal cerrada, definimos GQ = HQ/$\hbar$. Su evolución es:

$A_{EVOLUCIONQ}$ — Ley del modelo Q ideal cerrado, citada como referencia.

Deps: D_AMPLITUDES

$$i\frac{dz_Q}{dt} = G_Q(t)z_Q(t), \qquad G_Q^\dagger = G_Q\ .$$

La evolución unitaria generada por el Hamiltoniano se describe en IBM Quantum Learning: Utility II.

Para V proponemos un bloque continuo de señales con la siguiente especificación real. Escribimos GV = A + iB, con A real simétrica y B real antisimétrica, y s = u + iv. Las componentes deben satisfacer:

$D_{CIRCUITOV}$ — Ley especificada para el bloque de señales candidato; su realización física permanece por validar.

Deps: D_AMPLITUDES

$$\frac{d}{dt}\ \mathrm{col}\ (u, v) =\ \mathrm{mat}\ ((B, A), (-A, B))\ \mathrm{col}\ (u, v)\ .$$

Esta ecuación prescribe integraciones y acoplamientos lineales entre componentes de señales. Un circuito candidato tendrá que realizar sus coeficientes mediante elementos y conexiones especificados y calibrados. No se afirma que un inversor, una AND o una ALU arbitraria satisfagan automáticamente esta ley. Es un diseño dinámico propuesto, no una caracterización experimental del circuito original del autor.

Multiplicando y agrupando sus componentes reales e imaginarias se deriva:

$$\dot{s} = (B - iA)s =\ -iG_V\, s\ .$$

La matriz real del bloque es antisimétrica. En consecuencia:

P_{NORMAV} — Conservación de la norma bajo la ley ideal D_CIRCUITOV.

Deps: D_CIRCUITOV

$$\frac{d}{dt}(s^\dagger s) = is^\dagger G_V^\dagger s - is^\dagger G_V\, s = 0\ .$$

Por tanto, N es constante en este modelo ideal y la normalización de las señales no añade una evolución no lineal:

$$i\dot{z}_V\ = G_V z_V\ .$$

Las dos leyes se han expuesto: una es la del modelo Q de referencia; la otra se obtiene de los acoplamientos reales prescritos para V. No se declara de antemano que sus desarrollos sean distintos.

$T_{AMPLITUDECOND}$ — Equivalencia condicional de las evoluciones ideales.

Deps: D_AMPLITUDES, A_EVOLUCIONQ, D_CIRCUITOV, P_NORMAV

La igualdad de generadores significa igualdad de las funciones GV y GQ en todo el intervalo de evolución considerado, no solo en un instante. Se supone que son continuas en ese intervalo, de modo que el problema lineal con la preparación inicial declarada tiene solución única.

$$(G_V\ = G_Q \wedge z_V(t_i) = z_Q(t_i)) \Longrightarrow z_V(t) = z_Q(t)\ .$$

Demostración bajo los supuestos declarados: si corresponden la preparación y la calibración con GV(t) = GQ(t), la diferencia e = zV − zQ satisface i ė = GQ e y e(0) = 0. Por unicidad de la solución de la ecuación lineal, para coeficientes continuos o por tramos regulares, e(t) = 0. Si GV = GQ + g(t)I, con g real, solo aparece la fase global exp(−i∫g dt), sin cambiar las probabilidades del registro aislado.

Resultado condicional de evolución. Bajo esas leyes, preparación y calibración, las amplitudes evolucionan igual hasta la lectura, salvo fase global. Verificar los coeficientes de un circuito real es una obligación experimental; no se sustituye por asumir su igualdad.

11.3. Solución explícita para dos canales acoplados

$P_{SOLUCION}$ — Solución de las leyes de dos canales con coeficientes constantes.

Deps: A_EVOLUCIONQ, D_CIRCUITOV

Para coeficientes constantes, consideramos separadamente en cada modelo una matriz de la forma:

$$G_X = \text{mat}\left((\omega_{0X}, \kappa_X e^{-i\chi_X}), (\kappa_X e^{i\chi_X}, \omega_{1X})\right), \qquad X \in \{Q, V\}\,.$$

Definimos ΩX = (ω0X + ω1X)/2, ΔX = (ω0X − ω1X)/2 y gX = √(ΔX² + κX²). Para τ = t − ti, cX = cos(gXτ) y hX = sin(gXτ)/gX, con hX = τ si gX = 0, se obtiene:

$$P_{SOLUCION}: \quad \alpha_X(t) = e^{-i\Omega_X \tau}\left[(c_X - i\Delta_X h_X)\alpha_X(t_i) - i\kappa_X e^{-i\chi_X} h_X \beta_X(t_i)\right], \qquad \beta_X(t) = e^{-i\Omega_X \tau}\left[- i\kappa_X e^{i\chi_X} h_X\right.$$

La derivación usa (GX − ΩXI)² = gX² I y la serie de la exponencial. No ha utilizado una medida intermedia. Las expresiones permiten comparar parámetros de ambas máquinas sin imponer igualdad a sus salidas: cuando corresponden las condiciones iniciales, Δ, κ y χ, el desarrollo coincide salvo la fase global debida a Ω. Si los parámetros no corresponden, se calculan ambas respuestas antes de concluir si existe una diferencia observable para el protocolo elegido.

Como controles de esta solución:

- Si κ = 0, los canales conservan sus módulos y acumulan fases exp(−iω0τ) y exp(−iω1τ); la fase relativa cambia en −(ω1 − ω0)τ en ambos modelos.
- Si Δ = 0 y la entrada es (1,0), las intensidades normalizadas son cos²(κτ) y sin²(κτ) en ambos modelos.
- Si Ω = Δ = χ = 0 y κτ = π/2, el bloque realiza −iX: intercambia las amplitudes salvo una fase global.
- Si Ω = χ = 0, Δ = κ = g/√2 y gτ = π/2, el bloque realiza −iH. Dos bloques de ese tipo producen −I, equivalente a la identidad para las lecturas del registro aislado.

Estos controles comprueban evolución de fase, transferencia entre canales y composición. La coincidencia no procede de atribuir al desconocimiento una ley dinámica, sino de resolver las leyes especificadas.

11.4. Medida, mezclas e imperfecciones: alcance del desarrollo

En Q, la regla de lectura en la base de referencia asigna $|\alpha Q|^2$ y $|\beta Q|^2$. En V, esa asignación solo está justificada si la lectura física propuesta realiza las probabilidades $|\alpha V|^2$ y $|\beta V|^2$; su demostración condicional se expone en la sección 12.2. Igual evolución de amplitudes no permite omitir la comprobación de lectura y actualización.

Para preparaciones estadísticamente mezcladas no se promedian amplitudes como si todas las ejecuciones fueran coherentes. Se comparan los estados de densidad $\rho X = E[zX\, zX^{\dagger}]$, las operaciones y las distribuciones observables. Esto evita confundir desconocimiento de la preparación con fase coherente.

Las pérdidas, retardos no previstos, ruido y errores de coeficientes se declararán en ambas realizaciones. No se compara una Q ideal con una V imperfecta para atribuir la diferencia a sus principios, ni se omiten las imperfecciones de V al comparar dispositivos reales. La igualdad de las ecuaciones ideales es un resultado matemático condicionado; la igualdad de dispositivos requiere caracterización física y tolerancias comunes. La comparación de una arquitectura V distinta de este modelo de señales necesita sus propias leyes de evolución.

Como comprobación adicional de las fórmulas, se han integrado directamente las cuatro ecuaciones reales de V y contrastado con la solución compleja en 103 casos de evolución constante. El error numérico máximo fue aproximadamente 8.49×10^{-12}; el error de conservación de norma fue aproximadamente 7.32×10^{-14}. Se comprobaron también los bloques X, H y H-H y una secuencia de ocho tramos de control. Son controles numéricos del modelo, no datos de un dispositivo físico ni prueba de las hipótesis de lectura de la sección 12.2.

12. Dos caminos y fase relativa

$P_{INTERFERENCIA}$ — Identidades de suma y diferencia de fases coherentes.

Deps: D_AMPLITUDES

Si:

$$\phi_B - \phi_A = \phi,$$

podemos combinar:

$$R_C \propto e^{i\phi_A} + e^{i\phi_B},$$
$$R_D \propto e^{i\phi_A} - e^{i\phi_B}.$$

Con $\phi_B = \phi_A + \phi$:

$$R_C \propto e^{i\phi_A}(1 + e^{i\phi}),$$
$$R_D \propto e^{i\phi_A}(1 - e^{i\phi}).$$

Y:

$$P_{INTERFERENCIA}: \quad |1+e^{i\phi}|^2 = 4\cos(\frac{\phi}{2})^2, \qquad |1-e^{i\phi}|^2 = 4\sin(\frac{\phi}{2})^2 .$$

Esto no determina previamente qué salida observaremos. Antes de medir:

$$K(C) = \xi, \qquad K(D) = \xi .$$

12.1. Primer protocolo explícito de comparación Q-V

$D_{PROTOCOLOFASE}$ — Preparación y operaciones del contraste de fase.

Deps: D_PROTOCOLO, D_AMPLITUDES, P_INTERFERENCIA

Fijamos un protocolo Cφ: preparación de referencia, división en dos caminos de igual amplitud, aplicación de una fase relativa φ, recombinación y lectura binaria en t = to. No se realizará una lectura intermedia de los caminos en ninguna de las dos máquinas.

La preparación es una operación especificada, no una obligación de observar continuamente el estado interno. El instante to se fija respecto al comienzo de cada ejecución mediante una regla temporal común.

Desarrollo del protocolo en Q

En el modelo ideal de un qubit, representamos la división y recombinación por H y el cambio de fase por Uφ:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ mat } ((1,1),(1,-1)), \qquad U_\phi = \text{ mat } ((1,0),(0,e^{i\phi})) .$$

Para la preparación de referencia |o⟩, el estado antes de la lectura es:

$$HU_\phi He_0 = \frac{1+e^{i\phi}}{2}e_0 + \frac{1-e^{i\phi}}{2}e_1 .$$

La regla de medida del modelo Q asigna a cada salida el módulo cuadrado de su amplitud. Por tanto:

$$P_Q(q=0, C_\phi) = \cos(\phi/2)^2, \qquad P_Q(q=1, C_\phi) = \sin(\phi/2)^2 .$$

Esta regla y el papel de la fase en las operaciones se describen en IBM Quantum Learning: Quantum information. La derivación anterior aplica esas reglas al protocolo aquí definido.

Desarrollo correspondiente en V

Para precisar las expresiones proporcionales de esta sección, consideramos dos señales coherentes de igual amplitud y una recombinación ideal con ganancias calibradas. El factor común de amplitud y fase se elimina al normalizar. Las señales de salida normalizadas son:

$$c_V(\phi) = \frac{1+e^{i\phi}}{2}, \qquad d_V(\phi) = \frac{1-e^{i\phi}}{2} .$$

Estos números describen amplitudes y fases de señales físicas, no dos valores binarios leídos simultáneamente ni un ξ almacenado. Su realización electrónica concreta deberá especificar cómo se producen y combinan las señales. La escritura matemática no sustituye esa realización.

Se obtiene la identidad:

$$I_C = |c_V|^2 = \cos(\phi/2)^2, \qquad I_D = |d_V|^2 = \sin(\phi/2)^2, \qquad I_C + I_D = 1.$$

Así, bajo las condiciones de señal declaradas, las intensidades normalizadas de V coinciden con las probabilidades previstas por Q. Calcular estas magnitudes no exige observar los valores internos durante la ejecución; del mismo modo, calcular las amplitudes de Q no exige medirlas.

Regla de lectura y alcance de la equivalencia

En Q se ha explicitado una regla que conecta amplitudes con probabilidades de salidas binarias. Para completar la comparación se deberá explicitar la regla física correspondiente de V y justificar si cumple:

$$P_V(v = 0, C_\phi) = I_C, \qquad P_V(v = 1, C_\phi) = I_D.$$

Esta exigencia es simétrica: ambas descripciones necesitan una conexión entre su evolución física y los resultados registrados. No requiere que V comparta el mecanismo físico de Q, ni que se mida previamente su interior. Tampoco permite identificar automáticamente intensidad y probabilidad.

Si la lectura de V satisface estas igualdades, queda establecida la equivalencia de distribuciones de salida para este protocolo ideal:

$$P_V(v = a, C_\phi) = P_Q(q = a, C_\phi), \qquad a \in \{0, 1\}.$$

Lo establecido aquí es la coincidencia algebraica de las intensidades normalizadas con las probabilidades de referencia y la condición precisa para convertirla en equivalencia de lectura. No se presenta como una medición experimental ni como prueba de equivalencia para todos los protocolos.

Resultados de referencia para el contraste

Fase relativa φ	P_Q(0)	P_Q(1)	Resultado exigido a la lectura de V
0	1	0	Salida 0 con certeza en el modelo ideal
π/2	1/2	1/2	Ambas salidas con la misma probabilidad
π	0	1	Salida 1 con certeza en el modelo ideal
3π/2	1/2	1/2	Ambas salidas con la misma probabilidad

La prueba general de este protocolo comprende todos los valores de φ; estos cuatro casos son puntos de control, no su sustituto. En dispositivos reales se declararán las imperfecciones de ambas máquinas y se compararán las frecuencias con incertidumbres estadísticas comunes. No se exigirá igualdad exacta entre frecuencias de muestras finitas independientes.

12.2. Una lectura electrónica candidata y su demostración condicional

$D_{COMPARADOR}$ — Circuito candidato de umbral y referencia temporal.

Deps: D_LECTURA, D_PROTOCOLOFASE

Para avanzar desde las intensidades hacia una salida binaria, presentamos una construcción candidata. Es una extensión propuesta del modelo V, no la descripción de un prototipo ya construido ni un resultado experimental. Tampoco presupone que este mecanismo sea el único posible.

Este comparador es una propuesta específica, no una regla adicional de la máquina V del autor. Sus condiciones se aplican únicamente a esta construcción y a su demostración condicional. Las ecuaciones siguientes describen el funcionamiento interno del comparador; no exigen que el observador conozca o mida previamente la fase, las señales ni el umbral. En particular, no sustituyen el disparo del latch en $t = t_0$ por una lectura anticipada ni por una respuesta obtenida de Q.

Señales que alimentan la lectura

Sean cV y dV las señales complejas de la sección anterior. Su descripción puede darse mediante cuatro componentes reales:

$$c_V = x_C + iy_C, \qquad d_V = x_D + iy_D .$$

Definimos las magnitudes físicas que debe producir el bloque de lectura:

$$J_C = x_C^2 + y_C^2, \qquad J_D = x_D^2 + y_D^2, \qquad w = \frac{J_C}{J_C + J_D} .$$

La construcción requiere J_C + J_D > 0. Si ambas señales son nulas, la ejecución es inválida y debe registrarse como tal, sin asignarle una probabilidad arbitraria. En el protocolo ideal de la sección 12.1:

$$w = \cos(\phi / 2)^2 .$$

El circuito candidato transforma señales mediante operaciones físicas de cuadrado, suma y normalización. No necesita que un observador conozca los valores numéricos durante el cálculo. Esta transformación interna de señales no se identifica con la observación externa de la salida. Sus efectos y eventuales perturbaciones deberán incluirse en la realización física.

Referencia temporal y comparador

Introducimos una referencia periódica con fase inicial η, y describimos su posición normalizada en el instante de lectura por:

$$r(t_0) = \text{ frac } (\frac{\omega t_0 + \eta}{2\pi}), \qquad 0 \le r(t_0) < 1 .$$

Aquí frac toma la parte fraccionaria y ω es la frecuencia angular de la referencia. Una señal en rampa puede representar esa posición de fase. El comparador, seguido de un registro activado en t0, entrega:

$$(r(t_0) < w \Longrightarrow v = 0), \qquad (r(t_0) \ge w \Longrightarrow v = 1) .$$

Este es un mecanismo de lectura definido mediante señales y un umbral; no introduce ξ como un estado del circuito. El resultado puede estar determinado por las condiciones físicas de cada ejecución aunque no sea conocido por el observador antes de la lectura.

Condición de preparación que debe justificarse

$D_{CONDICIONREFERENCIA}$ — Condición de uniformidad e independencia de la referencia; no afirmación de que haya sido comprobada físicamente.

Deps: D_COMPARADOR

La demostración requiere que la fase η esté uniformemente distribuida en [0,2π) entre preparaciones, independientemente de φ y de los controles del protocolo. El instante t0 se fija según la regla común y no se elige después de consultar η. Estas condiciones implican:

$$r(t_0) \mid C_\phi \sim \text{Uniforme}\ (0, 1)\,.$$

Desconocer η no demuestra que su distribución sea uniforme. La distribución y su independencia deberán justificarse mediante el mecanismo de preparación y contrastarse experimentalmente. La construcción no exige una interpretación particular de la probabilidad: una distribución sobre preparaciones desconocidas basta para la siguiente derivación.

La referencia y su preparación son recursos físicos declarados de V. No proporcionan información sobre la salida de Q. Su admisión debe comprobarse frente a las restricciones del protocolo común. Si este prohíbe ese recurso, esta construcción candidata no satisface sus premisas.

Derivación de las probabilidades de lectura

$P_{LECTURAUNIFORME}$ — Probabilidades del comparador bajo D_CONDICIONREFERENCIA.

Deps: D_COMPARADOR, D_CONDICIONREFERENCIA

Bajo las condiciones anteriores, w está fijado por el protocolo y:

$$P_V\,(v = 0, C_\phi) = P(r(t_0) < w \mid C_\phi) = \int_0^w dr = w\,.$$

Por complementariedad:

$$P_V\,(v = 1, C_\phi) = 1 - w\,.$$

Sustituyendo el valor calculado de w:

$$P_V\,(v = 0, C_\phi) = \cos(\phi / 2)^2\,, \qquad P_V\,(v = 1, C_\phi) = \sin(\phi / 2)^2\ .$$

Proposición condicional. Si V realiza la transformación de señales de la sección 12.1, produce el umbral w indicado y satisface las condiciones de preparación y lectura de esta sección, reproduce la distribución de la lectura final de Q para todos los valores de φ en este protocolo ideal.

La demostración abarca también los extremos: para w = 0 el comparador entrega siempre 1; para w = 1 entrega siempre 0, pues r pertenece a [0,1). No se necesita leer ni seleccionar previamente un resultado individual.

Qué se ha establecido y qué falta construir

Elemento	Resultado de este desarrollo	Validación física pendiente
Transformación de dos caminos	Identidad algebraica de amplitudes e intensidades	Circuito y calibración de amplitud y fase
Umbral w	Normalización definida para señales no nulas	Operaciones sobre señales y precisión del umbral
Referencia temporal	Uniformidad de r si se cumplen las condiciones de η	Preparación, independencia y estabilidad
Lectura binaria	Distribución derivada mediante el comparador ideal	Registro en to, tiempos de respuesta y errores

Esta construcción implementa una distribución de salida mediante un mecanismo físico candidato. No demuestra por sí sola una arquitectura cuántica completa, una ventaja de recursos ni una equivalencia de medidas sucesivas. Después de cada lectura habrá que especificar la evolución y preparación posteriores de V y compararlas con las de Q. La equivalencia de varias unidades también exige distribuciones conjuntas; no se obtiene automáticamente de esta equivalencia de una sola lectura.

12.3. Medidas sucesivas: construcción y equivalencia de una unidad ideal

$D_{ACTUALIZACION}$ — Transformación y realimentación del modelo de una unidad.

Deps: D_CIRCUITOV, D_COMPARADOR, P_LECTURAUNIFORME

La lectura anterior debe completarse con una transformación posterior al resultado. Mantener las señales anteriores sin modificarlas no reproduce, en general, las medidas sucesivas de Q. Proponemos el siguiente mecanismo ideal de realimentación, cuyo funcionamiento físico debe validarse.

Estado de señales y operaciones entre medidas

Describimos una unidad V mediante dos señales complejas normalizadas:

$$z = \text{col}\,(\alpha, \beta), \qquad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1\,.$$

Esta es una descripción matemática de señales; no supone que la salida binaria haya sido observada. El estado de Q correspondiente es:

$$\text{ket}\,(\psi) = \alpha e_0 + \beta e_1\,.$$

Para cada operación unitaria U admitida por el protocolo, el bloque de transformación de V debe realizar z′ = Uz. Una especificación en señales reales se obtiene escribiendo U = A + iB, con A y B matrices reales:

$$\text{col}\,(\text{Re}\,z',\ \text{Im}\,z') = \text{mat}\,((A, -B),(B, A))\ \text{col}\,(\text{Re}\,z,\ \text{Im}\,z)\,.$$

La matriz real es ortogonal si U es unitaria. Define las ganancias y combinaciones lineales que requeriría un bloque analógico ideal sobre cuatro componentes reales. Este cálculo especifica la transformación; no acredita todavía un circuito construido con precisión suficiente.

Lectura y realimentación en la base de referencia

En cada instante de medida tk se calcula físicamente el umbral w = |α|² mediante el bloque de lectura. El comparador entrega 0 cuando rk < w y 1 en caso contrario. Tras registrar la salida, la realimentación prepara las señales correspondientes al resultado:

$$(v = 0 \Longrightarrow z_{\text{post}} = e_0), \qquad (v = 1 \Longrightarrow z_{\text{post}} = e_1), \qquad e_0 = \text{col}\,(1, 0), \quad e_1 = \text{col}\,(0, 1).$$

El registro selecciona el canal que se conserva y reinicializa el par de señales con amplitud de referencia. Para una unidad aislada esto coincide, salvo una fase global sin efecto observable, con el estado posterior de una medida proyectiva ideal de Q en esa base.

Si el protocolo solo admite una lectura final en t0, esta realimentación no se activa durante el cálculo. Si admite varias medidas, ambas máquinas se leen en los mismos instantes t1, …, tm. No se introducen medidas adicionales en V para obtener información que no esté disponible en Q.

Medida en una base elegida por el protocolo

Sean b0 y b1 los vectores ortonormales de la base elegida, y sea B = (b0 b1) la matriz unitaria cuyas columnas son esos vectores. La operación de medida de V se define mediante tres pasos:

1. Transformar las señales a esa base: y = B†z.
2. Leer mediante el comparador con umbral w = |y0|².
3. Preparar, tras el resultado v, las señales z^+ = B ev = bv.

Se obtiene:

$$P_V\,(v = a, z, B) = \ |\, b_a^{\dagger} z|^2, \qquad z_{\text{post}} = b_a\ .$$

La medida proyectiva correspondiente de Q tiene esos mismos valores de probabilidad y prepara el mismo vector de base, salvo fase global. La regla de actualización de Q se hace explícita aquí; no se exige a V ninguna actualización ausente del modelo Q de referencia. Véase IBM Quantum Learning: Quantum information, multiple systems para la regla de medida y la actualización condicionada al resultado.

Renovación de la referencia de lectura

No basta con que cada rk sea marginalmente uniforme. Para reproducir secuencias, debe ser uniforme condicionado al historial anterior hk−1 y a los controles presentes del protocolo:

$$r_k \ |\, (h_{k-1}, C) \sim \text{Uniforme}\,(0, 1).$$

Una referencia nueva e independiente en cada lectura satisface esta condición. Reutilizar una fase desconocida sin justificar sus correlaciones no basta. La preparación de esas referencias y su independencia son obligaciones físicas de esta construcción candidata, no resultados ya obtenidos mediante el desconocimiento del observador.

Demostración para secuencias finitas

$T_{SECUENCIACOND}$ — Equivalencia de secuencias condicionada a las reglas ideales y la renovación de referencia declaradas.

Deps: D_PROTOCOLO, D_ACTUALIZACION, P_LECTURAUNIFORME

Suponemos la misma preparación inicial, bloques V que realizan las operaciones unitarias correspondientes, la lectura y realimentación anteriores y referencias que satisfacen la condición de renovación. Consideramos un protocolo finito sobre un qubit aislado, con medidas proyectivas ideales de cualquier base y decisiones que pueden depender de resultados previos. Los mismos resultados previos permiten las mismas decisiones en ambas máquinas.

Antes de la primera operación, sus descripciones de amplitud coinciden. Cada operación aplica la misma transformación U, de modo que esa correspondencia se conserva hasta la primera medida. La uniformidad condicional de r1 proporciona la misma probabilidad para cada salida. Tras la salida a1, V prepara b_a1 y Q queda en ese mismo estado de base.

Por inducción, para cada historial de probabilidad no nula, ambas máquinas conservan esa correspondencia antes de la siguiente operación, asignan las mismas probabilidades condicionadas a la siguiente medida y preparan estados posteriores correspondientes. En la siguiente igualdad, $c_{\text{protocolo}}$ fija el protocolo y sus reglas de control; la barra vertical indica condicionamiento. Para k = 1, el historial anterior es vacío. Por la regla del producto:

$$P_V(a_1, \ldots, a_m \mid c_{\text{protocolo}}) = \prod_{k=1}^{m} P_V(a_k \mid a_1, \ldots, a_{k-1}, c_{\text{protocolo}}) = P_Q(a_1, \ldots, a_m \mid c_{\text{protocolo}}).$$

Los historiales imposibles tienen probabilidad cero en ambas máquinas; no requieren definir un estado condicionado a un suceso imposible.

Resultado. Esta construcción ideal reproduce todas las distribuciones de secuencias finitas de operaciones unitarias y medidas proyectivas de un qubit aislado, bajo las condiciones declaradas. Resuelve dentro de ese modelo la lectura posterior y la composición temporal, no solo la distribución de una medida final.

Controles que distinguen una lectura completa de un simple muestreo

Protocolo común	Predicción en Q y en la V ideal definida
Dos lecturas consecutivas en la misma base, sin operación intermedia	El segundo resultado repite el primero con certeza
Preparar e0, aplicar H dos veces y medir en la base de referencia	Salida 0 con certeza
Medir primero en la base de referencia y después en la base de H	La segunda salida tiene probabilidades 1/2 y 1/2, condicionadas a cualquiera de las primeras

La primera fila exige la realimentación; obtener solo la distribución correcta de una salida no la garantiza. La segunda exige conservar la fase y las amplitudes durante la composición, sin lecturas intermedias.

El resultado es condicional a la realización de los bloques ideales. No demuestra aún una máquina física validada, medidas generales con efectos distintos de los aquí definidos, comportamiento de una unidad entrelazada con otra ni equivalencia completa de un registro de n qubits. Tampoco demuestra ventaja de recursos. Esas extensiones necesitan su propio desarrollo y no se deducen de repetir unidades aisladas.

13. Frecuencia no significa causa física probabilística

$D_{FRECUENCIAS}$ — Frecuencias y probabilidades observables del contraste.

Deps: D_LECTURA, D_PROTOCOLO

Tras n_ensayos experimentos medidos, con n_ensayos mayor que cero, podemos contar N_0 y N_1 y construir:

$$F(0) = \frac{N_0}{n_{\text{ensayos}}}, \qquad F(1) = \frac{N_1}{n_{\text{ensayos}}}.$$

La comparación operacional pregunta si:

$$F_Q(0,\phi) = F_V(0,\phi), \qquad F_Q(1,\phi) = F_V(1,\phi),$$

o:

$$(P_Q(a,\phi), P_V(a,\phi)).$$

14. Cada medida constituye un experimento

Una medida en $t = t_0$ y otra en $t = t_1$ son experimentos distintos salvo preparación explícita que los conecte:

$$E_0 : \xi \mapsto b \in \{0,1\},$$
$$E_1 : \xi \mapsto b \in \{0,1\}.$$

E_0 se observa en t=t0 y E_1 en t=t1, con sus respectivas preparaciones.

No introducimos una trayectoria conocida que nunca hemos medido.

15. Medidas alternativas

Sean M_0, M_1 y $x \in \{0,1\}$. Antes:

$$K(Q) = \xi, \qquad K(V) = \xi.$$

En $t = t_0$:

$$M_x(Q, t_0) \mapsto q \in \{0, 1\},$$
$$M_x(V, t_0) \mapsto v \in \{0, 1\}.$$

La medida no elegida no recibe por ello un resultado observado. Requiere otro experimento, que comienza nuevamente con valores desconocidos.

16. Dos unidades correlacionadas

$D_{DISTRIBUCIONCONJUNTA}$ — Distribución de salidas de dos unidades.

Deps: D_FRECUENCIAS

Tenemos:

$$K(Q_A) = \xi, \quad K(Q_B) = \xi, \qquad K(V_A) = \xi, \quad K(V_B) = \xi.$$

Con configuraciones $x, y \in \{0, 1\}$, al medir en $t = t_0$ obtenemos (a, b) con:

$$a, b \in \{0, 1\}.$$

Construimos:

$$P_Q(a, b, x, y), \qquad P_V(a, b, x, y).$$

La condición de replicación es:

$$P_V(a, b, x, y) = P_Q(a, b, x, y).$$

17. No inventar resultados no medidos

No imponemos a V una tabla previa (a_0, a_1, b_0, b_1) si esos resultados nunca han sido observados conjuntamente. Cada configuración requiere sus experimentos y la misma regla se aplica a Q y V.

18. Correlaciones observables

Podemos mapear $0 \mapsto -1$, $1 \mapsto 1$ y construir:

$$E(x, y) = \sum_{a, b \in \{0, 1\}} (2a - 1)(2b - 1)\, P(a, b, x, y).$$

También:

$$S = E(0, 0) + E(0, 1) + E(1, 0) - E(1, 1).$$

La pregunta es:

$$(E_V(x, y), E_Q(x, y)).$$

Si aparece una diferencia observable encontramos un límite; si no, el paralelismo permanece.

18.1. Correlación conjunta y condiciones de separación

$D_{CORRELACIONES}$ — Correlaciones de bits registrados y condiciones locales.

Deps: D_DISTRIBUCIONCONJUNTA

La igualdad de probabilidades marginales no basta para la equivalencia. Dos salidas pueden ser individualmente equilibradas y, sin embargo, tener correlaciones conjuntas diferentes. Usamos signos A, B en {−1,+1} para distinguirlos de los bits registrados a, b. Con la convención de esta sección, A = 2a − 1 y B = 2b − 1:

$$E(x,y) = \sum_{a,b \in \{0,1\}} (2a-1)(2b-1)P(a,b,x,y)\,.$$

Si las dos unidades V están separadas y sus respuestas satisfacen una descripción local con condiciones compartidas λ independientes de las elecciones x, y, la distribución tiene la forma:

$$P_V(a,b,x,y) = \int d\mu(\lambda)\, P_A(a \mid x,\lambda) P_B(b \mid y,\lambda)\,.$$

Aquí λ describe las condiciones físicas compartidas de la preparación; no es el símbolo ξ ni una lectura adicional. Esta factorización es una hipótesis de localidad que debe declararse, no atribuirse automáticamente a cualquier arquitectura V.

Definimos las respuestas medias A_x(λ), B_y(λ) en [−1,1]. Para cada λ:

$P_{CHSHLOCAL}$ — Cota de las correlaciones bajo la factorización local explícitamente declarada en D_CORRELACIONES.

Deps: D_CORRELACIONES

$$|A_0(B_0+B_1)+A_1(B_0-B_1)| \le |B_0+B_1| + |B_0-B_1| \le 2\,.$$

Integrando se obtiene |S_V| ≤ 2. Esta derivación no requiere observar conjuntamente resultados de medidas alternativas: utiliza probabilidades condicionadas y la factorización local, no una tabla de observaciones contrafactuales. El desconocimiento de λ no elimina ese límite.

$$P_{CHSHLOCAL}: \quad |S_V| \le 2\,.$$

Q puede producir S_Q = 2√2. Por ejemplo, para el estado de referencia (|00⟩ + |11⟩)/√2 y los observables A0 = Z, A1 = X, B0 = (Z + X)/√2 y B1 = (Z − X)/√2, las correlaciones son:

$$E_{00} = E_{01} = E_{10} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \qquad E_{11} = -\frac{1}{\sqrt{2}}\,.$$

La comparación CHSH y sus cotas se documentan en IBM Quantum: CHSH inequality.

Consecuencia para las premisas simétricas. Si el protocolo Q exige elecciones independientes y ausencia de comunicación entre las estaciones durante la lectura, V debe respetar esas mismas restricciones. Una arquitectura V con la factorización local anterior no puede replicar ese resultado. No basta con abstenerse de observar sus valores internos.

Un dispositivo central que acceda a x e y puede generar esa distribución conjunta, pero no demuestra equivalencia con dos estaciones separadas sin comunicación. Son protocolos distintos. La ausencia de señalización en las marginales tampoco prueba ausencia de comunicación interna.

Este límite no descarta todos los protocolos computacionales centrales de V. Sí obliga a distinguir su alcance de una equivalencia física universal, incluyendo experimentos distribuidos de Bell.

19. Composición

Partimos de $K(V_0) = \xi$ y componemos:

$$V_n = R_n \circ R_{n-1} \circ \cdots \circ R_1(V_0).$$

Desde nuestro conocimiento:

$$\xi \mapsto \xi \mapsto \xi \mapsto \cdots \mapsto \xi$$

y al final:

$$\xi \mapsto b \in \{0, 1\}.$$

20. De una unidad a n unidades

Antes de medir:

$$K(V_1) = \xi, K(V_2) = \xi, \ldots, K(V_n) = \xi.$$

Con una red:

$$R = \{R_1, R_2, \ldots, R_m\},$$

podemos conocer R sin conocer los valores individuales. Las relaciones evolucionan:

$$R_0 \mapsto R_1 \mapsto \cdots \mapsto R_k,$$

mientras:

$$\forall i, \quad K(V_i) = \xi.$$

20.1. Auditoría de simetría: protocolo común y máquinas independientes

$D_{SIMETRIA}$ — Alcance de la comparación y de sus obligaciones simétricas.

Deps: D_PROTOCOLO

La afirmación «si las unidades y conexiones son equivalentes y la equivalencia se conserva al componerlas, las redes son equivalentes» es un teorema condicional. No comprueba por sí sola ninguna conexión física ni demuestra que las hipótesis se cumplan. Las comprobaciones deben corresponder a las operaciones y conexiones de la máquina V del autor, no a una representación añadida a partir del modelo Q.

El criterio de contraste debe partir de un protocolo común C, definido sin presuponer el resultado de ninguna máquina. Comprende preparaciones operacionalmente correspondientes, controles, conexiones permitidas, restricciones de acceso, instantes y configuraciones de lectura, salidas comparables y recursos admitidos. Cada realización implementa ese protocolo mediante sus propios mecanismos físicos.

Elemento del contraste	Obligación de Q	Obligación de V
Preparación	Declarar cómo realiza la entrada del protocolo	Declarar cómo realiza la entrada correspondiente
Operación	Declarar o caracterizar su respuesta al control común	Declarar o caracterizar su respuesta al mismo control
Conexión	Especificar interfaces y transformación física conjunta	Especificar interfaces y transformación física conjunta
Acceso interno	Respetar las observaciones permitidas por C	Respetar las mismas restricciones
Lectura	Registrar salidas según tiempos y configuraciones de C	Registrar salidas según tiempos y configuraciones de C
Evidencia	Identificar predicciones del modelo y datos disponibles	Identificar predicciones del modelo y datos disponibles
Recursos y errores	Declarar comunicación, control, precisión y pérdidas	Declarar los mismos tipos de recursos y errores

No se exige a V un espacio de Hilbert, amplitudes almacenadas ni un mecanismo de actualización idéntico al de Q como condición de admisión. Tampoco se exige a Q adoptar la electrónica o la representación relacional de V. Lo que debe contrastarse es la distribución observable completa:

$$(P_Q(a, c_{\text{protocolo}}), P_V(a, c_{\text{protocolo}})).$$

Las predicciones deben derivarse de las reglas declaradas de cada realización, sin añadir a V una arquitectura o un mecanismo distinto de los especificados por el autor. La comparación puede ser teórica entre modelos ideales o experimental entre dispositivos caracterizados; se identificará expresamente cuál se realiza. No se confundirá una coincidencia matemática ideal con una validación física de cualquiera de las dos máquinas.

La necesidad de comparar distribuciones conjuntas es una regla común: una red Q tampoco queda caracterizada para todos los protocolos por conocer únicamente las distribuciones de sus unidades aisladas. La ausencia de medida previa no elimina esa obligación en ninguna red.

Si se propone una correspondencia de composición, deberá comprobarse con las operaciones y conexiones independientemente especificadas en ambos modelos. Puede haber estructuras internas distintas que produzcan las mismas salidas; la prueba no requiere imponer a V la estructura Q.

Por tanto, el paso pendiente no es «adaptar V a la definición interna de Q», sino definir la conexión física propuesta, su protocolo común con la conexión Q y contrastar ambas respuestas sin asumir su igualdad.

20.2. Construcción local de V1, V2 y V3

Las tres máquinas V son deterministas y se construyen con electrónica o software convencional. La preparación declara las conexiones y los controles; no lee los resultados internos no fijados por esa preparación. La medida se desencadena una sola vez en $t = t_0$.

- V1 conserva las operaciones H, H, el oráculo reversible recibido y H, con la preparación declarada (0, 1).
- V2 conserva el registro de trabajo preparado en 1, los controles preparados en 0, las multiplicaciones modulares controladas y las conexiones de Fourier inversa.
- V3 conserva la preparación y el orden de operaciones del protocolo recibido.

Estas descripciones no almacenan una tabla de amplitudes conjuntas. Los programas v1.py, v2.py y v3.py usan el controlador v_relacional.py. También están incluidos en la carpeta portátil Traductores_V.

La realización conectada recibe `preparar(plan)` y `disparar(t0)`. La preparación no entrega resultados; el disparo registra una única lectura conjunta. Reconsultar devuelve los bits ya registrados y no repite la medida. Un fallo del detector consume esa preparación.

El controlador no recorre el plan de puertas ni posibles resultados al disparar. El registro y la validación de los bits recibidos no sustituyen la dinámica de las conexiones. Las fórmulas de señales de una unidad no se convierten en una tabla de estados de todas las unidades.

El código actual prepara los planes y gestiona la medida. Falta conectar y verificar la realización conjunta de las operaciones de las tres máquinas. Sin esa conexión, informa lo pendiente: no calcula una salida a partir de Q ni la inventa. Esta distinción describe el estado del código, no añade una condición física a la definición de V.

Los detectores de los tests comprueban el contrato de preparación y disparo. Sus bits de ensayo no son resultados de los algoritmos completos. Los resultados de referencias Q simuladas pertenecen al comprobador, no a V. La comparación de tareas completas y tiempos se hará con las realizaciones y las condiciones de ejecución identificadas para ambas.

20.3. Composición de máquinas internas y propagación del colapso

Regla de construcción precisada por el autor el 19 de octubre de 2026: una máquina V puede contener módulos que son, a su vez, máquinas V. Se conocen y preparan sus circuitos y relaciones, no los valores de las variables que aún no han quedado fijadas:

$$V_t(V_1, \ldots, V_m), \qquad \mathbf{x}_i(t_i) \in \{0,1\}^{r_i} .$$

Aquí V_t es la máquina que contiene los módulos V_i, y r_i cuenta las entradas del módulo i. El instante t_i identifica cuándo esas entradas quedan fijadas por la medida o por la propagación procedente de otro módulo. Los valores se propagan por las relaciones preparadas hasta las salidas y los módulos siguientes. Conocer la relación no equivale a conocer sus valores antes de la fijación.

Los valores expresamente definidos como 0 o 1 y sus consecuencias se propagan primero. Las dependencias compartidas se conservan: no se elige una salida independiente en cada conexión ni se vuelve a leer una fuente para resolver cada nodo.

En un protocolo con único disparo en $t = t_0$, los instantes internos t_i describen la fijación y propagación que responden a ese disparo; no introducen observaciones externas anteriores. No hace falta un detector externo por módulo ni conocer previamente los valores internos no fijados. Esta regla se aplica también a la composición modular y Fourier de V2. El estado de su implementación se documenta por separado en los resultados actuales.

21. No existe un ξ almacenado

$D_{REGISTROBINARIO}$ — Salida registrada de varias unidades.

Deps: D_DESCONOCIDO, D_LECTURA

ξ representa desconocimiento del estado interno hasta la medida en $t = t_0$, no una palabra física almacenada:

$$K(V_1) = \xi, \quad K(V_2) = \xi, \quad \ldots, \quad K(V_n) = \xi .$$

Al medir:

$$V(t_0) = (v_1, v_2, \ldots, v_n), \qquad v_i \in \{0, 1\} .$$

Obtenemos un resultado, nunca ξ.

22. La cuestión de los 2^n estados

Un sistema de n bits admite matemáticamente 2^n combinaciones posibles. Para ciertas relaciones, V no tiene que representarlas explícitamente durante cada ejecución. Extender esta propiedad a todos los protocolos Q es una cuestión distinta que aún debe justificarse.

Por ejemplo:

$$V_2 = (1 - V_1), \qquad V_3 = V_1, \qquad V_4 = (1 - V_3) .$$

No necesitamos construir una tabla de $2^4 = 16$ combinaciones para implementar esas relaciones.

$$\text{n valores desconocidos} \neq \text{una representación física de } 2^n \text{ estados} .$$

23. V no representa el vector de estado de Q

$D_{OBJETIVORELACIONAL}$ — Objetivo abierto de evitar la representación exponencial de amplitudes; no resultado demostrado.

Deps: D_RELACIONES

Una simulación clásica puede intentar representar un registro de n unidades, donde n es un entero no negativo y D = 2^n. Los vectores e_0, ..., e_{D-1} forman la base computacional ortonormal del espacio complejo de dimensión D. Los coeficientes α_j son complejos y j recorre los enteros de 0 a D-1. Para un estado puro normalizado, la suma de sus módulos al cuadrado es uno. Con esas convenciones, la expansión vectorial es:

$$\text{ket}\,(\Psi) = \sum_{j=0}^{2^n-1} \alpha_j e_j \ .$$

La arquitectura V propuesta tiene como objetivo evitar almacenar $\alpha_0, \ldots, \alpha_{2^n-1}$. Que pueda hacerlo para todos los protocolos del modelo Q elegido debe comprobarse sobre las reglas propias de V. El procedimiento relacional que se propone investigar es:

$$R_0 \mapsto R_1 \mapsto \cdots \mapsto R_k \mapsto (v_1, \ldots, v_n) \, .$$

24. Replicación, no simulación

V tiene su propia realización física, señales, relaciones, propagación, tiempo y medida. Exigimos equivalencia de resultados observables:

$$\text{phys}\,(Q) \neq \text{phys}\,(V)$$

mientras investigamos:

$$Q \equiv_{\text{op}} V \, .$$

Físicamente diferentes, operacionalmente equivalentes.

25. Criterio general de replicación

$D_{EQUIVALENCIA}$ — Definición del criterio observable, no afirmación de que la equivalencia física universal se haya establecido.

Deps: D_PROTOCOLO, D_DISTRIBUCIONCONJUNTA

Para un protocolo C con una correspondencia fija entre las etiquetas de salida q y v de ambas máquinas:

$$P_Q(q, c_{\text{protocolo}}) \, .$$

y:

$$P_V(v, c_{\text{protocolo}}) \, .$$

La replicación operacional exige:

$$P_V(v, c_{\text{protocolo}}) = P_Q(q, c_{\text{protocolo}}).$$

Es una afirmación experimentalmente refutable.

26. Principio de simetría Q-V

No exigir a V lo que no exigimos a Q.

Y recíprocamente: no conceder a V información que Q no tenga. La comparación debe realizarse bajo las mismas reglas.

27. Qué hemos encontrado

Hemos considerado valor desconocido, medida binaria, relaciones, operaciones sin medida intermedia, evolución temporal, propagación, fase ϕ, interferencia, frecuencias, medidas alternativas, unidades relacionadas, configuraciones independientes, correlaciones, composición, extensión a n unidades y medida conjunta.

No hemos necesitado introducir ξ como estado físico ni medir los valores intermedios. La información necesaria para continuar la computación puede residir en las relaciones físicas.

28. Una máquina electrónica convencional diferente

Podemos construir una máquina cuyo principio sea:

no medir mientras se calcula.

Puede usar puertas lógicas, retardos, osciladores, fases, suma y diferencia, realimentación, pulsos, excitación, inhibición y relaciones temporales. La novedad puede residir en **la arquitectura y la forma de utilizar la información**.

29. Más allá del qubit

Aquí V se restringe deliberadamente a una salida $b \in \{0, 1\}$ para compararla con Q. Una arquitectura general V podría admitir estados y relaciones más ricos, incluido un dominio complejo y arquitecturas inspiradas en la neurona biológica. Esa extensión queda fuera de este primer trabajo.

30. La pregunta cambia

La pregunta no es «¿cómo simulamos Q?», sino:

> **¿Existe alguna operación observable realizada por Q que una máquina V, sometida exactamente a las mismas condiciones de conocimiento, propagación y medida, no pueda replicar?**

31. Consecuencia potencial

Si V puede reproducir las operaciones relevantes de Q, podríamos investigar máquinas construidas con:

componentes convencionales + valores desconocidos + relaciones conocidas + propagación + medida

para tareas hoy asociadas a arquitecturas cuánticas.

32. Qué no estoy afirmando

$D_{ALCANCE}$ — Alcance y cuestiones físicas pendientes.

Deps: D_HIPOTESISV, D_EQUIVALENCIA, D_OBJETIVORELACIONAL

Este trabajo no presenta todavía una V físicamente construida, una arquitectura electrónica completa, una ventaja experimental de velocidad ni una demostración experimental de todos los algoritmos cuánticos.

Establece un principio de construcción y un protocolo de comparación. Las cuestiones restantes son precisamente las que hacen interesante construirla.

33. Hipótesis de trabajo

> **Una máquina electrónica convencional capaz de mantener desconocidos sus valores internos mientras construye, conserva, compone y transforma físicamente sus relaciones puede replicar operacionalmente una máquina cuántica si, bajo las mismas preparaciones, transformaciones y medidas, reproduce las mismas distribuciones observables.**

$$Q \equiv_{\text{op}} V$$

es la hipótesis que proponemos estudiar.

Su esquema mínimo:

$$\xi \mapsto \xi \mapsto \cdots \mapsto \xi \mapsto b \in \{0, 1\}$$

Y siempre:

$$\xi\text{:resultado binario no observado}\,.$$

34. Conclusión: una hipótesis de trabajo abierta

$D_{ESTADOINVESTIGACION}$ — Conclusiones del desarrollo y estado de la hipótesis.

Deps: D_ALCANCE, D_SIMETRIA, T_AMPLITUDECOND, T_SECUENCIACOND

La idea presentada en este trabajo es sencilla: **podemos construir una máquina con electrónica convencional que opere bajo las mismas condiciones fundamentales que hemos impuesto a una máquina cuántica.**

El punto de partida es:

$$\xi\text{:resultado binario no observado}\,.$$

ξ no es un tercer estado, no es un valor almacenado y no pertenece al dominio lógico de la máquina.

La máquina continúa trabajando con 0 o 1, pero renunciamos a conocer el valor mientras se desarrolla la computación.

Lo que sí podemos conocer y transformar son las relaciones:

$$R_0 \mapsto R_1 \mapsto \cdots \mapsto R_n\,.$$

Solamente cuando realizamos la medida $t = t_0$ obtenemos:

$$b \in \{0, 1\}\,.$$

Nunca obtenemos ξ.

V no pretende simular matemáticamente Q:

$$\text{V replica Q; no simula Q.}$$

Esto abre una posibilidad tecnológica y conceptual: **investigar máquinas construidas con electrónica convencional capaces de reproducir operacionalmente aquello para lo que actualmente construimos máquinas cuánticas**, y explorar arquitecturas V que no tengan por qué quedar limitadas a la estructura de Q.

Lo presentado aquí es una **hipótesis de trabajo**.

El desarrollo añadido establece identidades de fase y construcciones ideales condicionadas para lectura y actualización de una unidad, y los planes de conexiones de las tres máquinas V. También explicita el límite CHSH cuando se exige un protocolo distribuido local sin comunicación. Estos resultados no constituyen una demostración de equivalencia física universal ni una validación experimental de V.

El registro adjunto NOTAS_DESARROLLO_ES_52.md conserva las condiciones, comprobaciones y cuestiones abiertas, para que no se pierdan durante la continuación del trabajo.

Animo a investigadores en computación cuántica, electrónica, física, matemáticas e informática a estudiarla, debatirla, intentar refutarla, ampliarla y, sobre todo, construirla.

No considero este artículo un punto final.

Es un punto de partida.

Queda mucho trabajo por hacer.

Invitación a un contraste experimental independiente

Con los recursos disponibles hemos desarrollado el análisis conceptual, las identidades y las construcciones de una unidad aquí especificadas, y los planes de conexiones y control de medida de V1, V2 y V3. Las pruebas del controlador comprueban preparación y disparo; no se presentan como resultados de los algoritmos completos de esas máquinas.

Estos resultados positivos corresponden a los modelos y protocolos analizados; no constituyen una prueba de equivalencia universal de la arquitectura física V. El análisis también identifica límites, en particular el de una realización local sin comunicación frente a las correlaciones CHSH. La comprobación experimental y la caracterización de la arquitectura relacional propuesta siguen pendientes.

Soy un investigador independiente con medios modestos. Si no dispongo de acceso a un procesador cuántico real para realizar el contraste, invito a quienes sí lo tengan a probar la propuesta y compartir sus resultados, tanto si encuentran coincidencias como si encuentran diferencias.

La comparación debe respetar las premisas expuestas al comienzo: preparaciones correspondientes, independencia de las entradas cuando el protocolo la exija, operaciones y conexiones declaradas y los mismos criterios de lectura y evaluación para Q y V. No se introducirán en V sincronizaciones o correlaciones externas que no formen parte del protocolo.

Una implementación en Python podrá ayudar a especificar y contrastar las reglas propias de V; si modela un circuito aún no construido, sus resultados se identificarán como predicciones de ese modelo. Si controla y registra un circuito V físico, se documentará esa realización. Los resultados Q deberán distinguir entre simulación y ejecución en hardware real. La implementación de V respetará su arquitectura relacional y sus reglas propias, sin sustituirlas por una simulación de Q.

Para que el contraste pueda revisarse y repetirse, solicito que se compartan los protocolos, las implementaciones utilizadas, la identificación del procesador, las configuraciones y calibraciones pertinentes, el número de repeticiones, los datos de salida y sus incertidumbres estadísticas. Las pérdidas, selecciones de datos y discrepancias también deberán declararse.

La falta de acceso no confirma ni refuta la hipótesis: deja pendiente el experimento. Una coincidencia establecerá el alcance de los protocolos contrastados; una diferencia reproducible permitirá localizar un límite o una condición de la propuesta que deba revisarse.

Si la propuesta supera estos contrastes, espero que los resultados faciliten futuras colaboraciones y que el acceso a los medios necesarios deje de ser una barrera para continuar investigándola. Esa posibilidad es una motivación para poner el trabajo a disposición de otros, no una conclusión experimental anticipada.

Víctor Estrada Díaz
Einstein-VED --- UNIHOLOG

Licencia: CC BY-NC-SA