

Indicador de Reducción de Costos de Verificación en Contratos Bancarios mediante Comunicación Cuántica Segura

Andrea Camila*

Resumen

Este artículo propone un indicador económico para evaluar la reducción de costos de verificación en contratos bancarios cuando se implementa comunicación cuántica segura. El Indicador de Reducción de Costos de Verificación Cuántica (IRCVC) cuantifica la eficiencia económica de adoptar protocolos de comunicación cuántica en procesos contractuales que requieren transmisión segura de información sensible. A partir de la literatura sobre aplicaciones financieras de computación cuántica y análisis de costos transaccionales, se desarrolla un marco analítico que descompone los costos de verificación en componentes afectados y no afectados por la tecnología cuántica. El indicador incorpora tanto los ahorros directos en costos de transmisión y validación como los costos de implementación tecnológica. Se demuestra que el IRCVC depende críticamente de tres parámetros: la intensidad de verificación contractual, la magnitud de reducción de costos unitarios y el costo de infraestructura cuántica. Los resultados sugieren que contratos con alta frecuencia de verificaciones y elevados requisitos de seguridad son candidatos prioritarios para adopción. El análisis revela condiciones específicas bajo las cuales la inversión en comunicación cuántica genera retornos positivos en el sector bancario.

Palabras clave: Comunicación cuántica, costos de verificación, contratos bancarios, indicador económico, eficiencia contractual

Clasificación JEL: D23, G21, O33, C65

1. Introducción

La industria bancaria enfrenta costos sustanciales asociados a la verificación y validación de información en procesos contractuales. Estos costos incluyen auditorías, monitoreo

*Este trabajo fue desarrollado en colaboración con AMLENTIA.org

de cumplimiento, validación de identidades, transferencias seguras de datos y detección de fraudes. La magnitud de estos costos afecta directamente la estructura de contratos financieros y, en casos extremos, puede impedir la formación de ciertos mercados.

La emergencia de tecnologías cuánticas, particularmente en el ámbito de comunicación segura, plantea interrogantes sobre su potencial impacto en la estructura de costos bancarios. Como señalan Islam et al. (2024), la computación cuántica ofrece ventajas competitivas en gestión de riesgo financiero a través de optimización de procesos y mejora en modelos de evaluación. Similarmente, Herman et al. (2022) identifican las finanzas como el primer sector en beneficiarse de quantum computing en el corto y mediano plazo, destacando aplicaciones en detección de fraude y procesamiento seguro de información.

Los protocolos de comunicación cuántica, fundamentados en principios que imposibilitan la interceptación no detectable, ofrecen propiedades de seguridad cualitativamente superiores a las tecnologías convencionales. Desde una perspectiva económica, esto se traduce en reducción potencial de costos asociados a validación criptográfica, verificación de integridad y protección contra fraude en transmisión de datos. Wheatley Research Consultancy (2024) subrayan que la computación cuántica revoluciona el procesamiento de información de manera exponencialmente más rápida, con implicaciones directas para seguridad de datos y frameworks económicos.

El presente trabajo desarrolla un indicador específico para cuantificar estas ganancias de eficiencia. A diferencia de aproximaciones previas que se concentran en aspectos tecnológicos o computacionales, este artículo adopta una perspectiva económica centrada en la pregunta: bajo qué condiciones la reducción de costos de verificación justifica la inversión en infraestructura de comunicación cuántica. Esta interrogante es particularmente relevante dado que, como observan Scholten et al. (2024), los computadores cuánticos actuales no están en nivel de madurez para producción en problemas industriales de larga escala, aunque se proyecta que serán capaces de computaciones económicamente impactantes en el futuro próximo.

La contribución principal consiste en la formulación del Indicador de Reducción de Costos de Verificación Cuántica (IRCVC), una medida que captura la ganancia neta derivada de implementar comunicación cuántica en procesos de verificación contractual bancaria. El indicador incorpora tanto los beneficios de menores costos operativos como los costos de inversión tecnológica, permitiendo análisis comparativos entre diferentes tipos contractuales y escenarios de implementación.

La motivación para este trabajo surge del reconocimiento de que, como establecen Bova et al. (2021), aplicaciones comerciales de computación cuántica en bancos y finanzas requieren marcos analíticos que traduzcan capacidades tecnológicas en beneficios económicos cuantificables. El indicador propuesto contribuye a este objetivo al ofrecer una

herramienta práctica para evaluación de inversiones en tecnología cuántica en el sector financiero.

El artículo se estructura de la siguiente manera: la segunda sección revisa literatura relevante sobre aplicaciones financieras de tecnologías cuánticas y teorías de costos transaccionales. La tercera sección desarrolla el marco conceptual que fundamenta el indicador. La cuarta sección presenta formalmente el IRCVC y deriva sus propiedades analíticas. La quinta sección analiza las implicaciones económicas del indicador para diferentes estructuras contractuales. La sexta sección discute aplicaciones prácticas y extensiones. La sección final concluye.

2. Revisión de Literatura

2.1. Aplicaciones Financieras de Tecnologías Cuánticas

La literatura sobre aplicaciones financieras de tecnologías cuánticas ha experimentado crecimiento exponencial en años recientes. Orús et al. (2019) proporcionan un overview fundamental, identificando que quantum annealers pueden optimizar portafolios, encontrar oportunidades de arbitraje y realizar credit scoring. El trabajo establece que quantum amplitude estimation resulta en speed-up cuántico para muestreo Monte Carlo con aplicaciones directas en pricing de derivados y análisis de riesgo.

Mugel et al. (2020) examinan casos específicos de algoritmos de optimización cuántica aplicados a problemas financieros, incluyendo previsión de crashes y optimización dinámica de portafolio. Su análisis revela que diferentes estrategias cuánticas (quantum annealers, procesadores basados en gates, tensor networks) ofrecen trade-offs distintos según el tipo de problema financiero.

En el contexto bancario específicamente, Gupta and Sharma (2023) demuestran que quantum computing ofrece performance mejorada, eficiencia aumentada y seguridad aprimorada. El trabajo identifica que la tecnología tiene capacidad de alterar fundamentalmente operaciones empresariales en sectores bancario, salud y logística. Esta perspectiva es reforzada por How and Cheah (2023), quienes documentan la evolución de nuevos modelos de negocio ejemplificados por Quantum-as-a-Service (QaaS).

Un hallazgo particularmente relevante proviene de Mudhol (2024), quien demuestra que quantum computing ofrece capacidades aprimoradas de procesamiento de datos y soluciones para problemas de optimización complejos en business analytics. Sin embargo, el estudio también identifica limitaciones técnicas, costos y problemas de accesibilidad como barreras principales para adopción.

2.2. Seguridad y Verificación en Sistemas Financieros

El aspecto de seguridad ha recibido atención considerable. de Wolf (2017) analiza el impacto potencial de computación cuántica en criptografía, destacando tanto la capacidad de quebrar sistemas actuales como el desarrollo de criptografía quantum-resistant. Esta dualidad es crucial para entender la urgencia de adoptar comunicación cuántica segura en aplicaciones financieras.

Wheatley Research Consultancy (2024) profundizan en las implicaciones societales, examinando cómo la computación cuántica afecta seguridad de datos, privacidad y frameworks económicos. El estudio identifica que capacidades ampliadas de data mining y vigilancia generan nuevas preocupaciones de privacidad, mientras que simultáneamente ofrecen oportunidades para mejorar detección de fraudes.

Desde una perspectiva empresarial, Aljaafari (2023) identifican seis áreas críticas para adopción de computación cuántica: escalabilidad limitada, desafíos regulatorios, alto costo inicial, disponibilidad limitada de recursos, educación y seguridad. El análisis enfatiza que quantum computing permite analizar grandes volúmenes de datos más eficientemente que computación clásica, crucial para gestión de operaciones y crecimiento económico.

2.3. Teoría de Costos Transaccionales y Acción Colectiva

Desde una perspectiva teórica económica, Holahan and Lubell (2016) establecen que dilemas de acción colectiva ocurren cuando decisiones conjuntas resultan en outcomes socialmente indesejables. Governance efectiva requiere framework institucional que altere positivamente los payoffs de cooperación y facilite monitoreo y enforcement. Este marco es relevante para entender cómo la reducción de costos de verificación puede modificar incentivos en relaciones contractuales.

Gilles (2010) proveen un framework de teoría de juegos cooperativos aplicado a redes sociales y organizaciones jerárquicas, útil para analizar estructuras contractuales en contextos donde múltiples partes interactúan bajo información asimétrica.

2.4. Evaluación y Benchmarking

La necesidad de evaluación rigurosa ha sido enfatizada por múltiples autores. Scholten et al. (2024) subrayan la importancia de establecer expectativas realistas sobre mejoras potenciales sobre técnicas clásicas. Identifican dos tendencias principales: métodos aproximados (algoritmos variaciones, mitigación de errores) y exploración comercial de aplicaciones relevantes para negocios.

Esta literatura establece el contexto para el desarrollo de indicadores específicos que permitan evaluación económica de tecnologías cuánticas en aplicaciones financieras. El

presente trabajo contribuye a esta agenda desarrollando un indicador enfocado específicamente en costos de verificación contractual.

3. Marco Conceptual

La construcción del Indicador de Reducción de Costos de Verificación Cuántica requiere primero establecer un marco conceptual que identifique los componentes relevantes de costos en procesos contractuales bancarios y cómo la comunicación cuántica afecta cada componente.

3.1. Estructura de Costos de Verificación

Los costos de verificación en contratos bancarios pueden descomponerse en cuatro categorías principales:

Primero, costos de transmisión segura de información (C_T) incluyen gastos asociados a encriptación, canales seguros de comunicación, validación de integridad de datos y protección contra interceptación. Estos costos son directamente afectados por la tecnología de comunicación empleada.

Segundo, costos de validación de identidad y autenticación (C_A) comprenden verificaciones de identidad, autenticación multifactor y validación de firmas digitales. La comunicación cuántica puede reducir parcialmente estos costos al proveer canales inherentemente seguros que simplifican protocolos de autenticación.

Tercero, costos de auditoría y monitoreo (C_M) incluyen revisión de documentación, verificación de cumplimiento contractual y detección de anomalías. Estos costos son parcialmente afectados por la tecnología cuántica en la medida que mejor seguridad en transmisión reduce necesidad de verificaciones redundantes.

Cuarto, costos de resolución de disputas y fraud detection (C_F) abarcan investigación de discrepancias, arbitraje y litigación. La comunicación cuántica puede reducir estos costos al proveer evidencia irrefutable de transmisiones, dado que cualquier intento de interceptación es detectable.

El costo total de verificación tradicional es:

$$C^{\text{trad}} = C_T + C_A + C_M + C_F \quad (1)$$

3.2. Impacto de Comunicación Cuántica

La comunicación cuántica impacta cada componente de manera diferenciada. Sea $\theta_i \in [0, 1]$ el factor de reducción para el componente i , donde $\theta_i = 0$ implica elimina-

ción completa del costo y $\theta_i = 1$ implica ningún impacto. El costo de verificación bajo comunicación cuántica es:

$$C^Q = \theta_T C_T + \theta_A C_A + \theta_M C_M + \theta_F C_F + K_{\text{op}} \quad (2)$$

donde K_{op} representa costos operativos adicionales de tecnología cuántica.

Los factores de reducción típicamente satisfacen: $\theta_T < \theta_A < \theta_M \approx \theta_F < 1$, reflejando que el mayor impacto ocurre en transmisión segura, seguido por autenticación, con efectos menores en monitoreo y resolución de disputas.

3.3. Inversión y Costos de Implementación

La adopción de comunicación cuántica requiere inversión inicial K_0 en infraestructura (equipamiento cuántico, actualización de sistemas, capacitación). Esta inversión debe amortizarse sobre el horizonte temporal del contrato.

Sea T la duración del contrato y r la tasa de descuento apropiada. El costo anualizado de inversión es:

$$K_A = K_0 \cdot \frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1} \quad (3)$$

Para contratos perpetuos o de duración indefinida, el límite cuando $T \rightarrow \infty$ da $K_A = r \cdot K_0$, representando el costo de capital de mantener la infraestructura.

3.4. Frecuencia de Verificación

Un aspecto crítico es la frecuencia con que ocurren verificaciones. Sea λ el número esperado de verificaciones por unidad de tiempo. Los costos totales anualizados bajo cada tecnología son:

Tecnología tradicional:

$$CT^{\text{trad}} = \lambda \cdot C^{\text{trad}} \quad (4)$$

Tecnología cuántica:

$$CT^Q = \lambda \cdot C^Q + K_A \quad (5)$$

La condición para que comunicación cuántica genere ahorros netos es $CT^Q < CT^{\text{trad}}$, lo cual se reduce a:

$$\lambda \cdot \Delta C > K_A \quad (6)$$

donde $\Delta C = C^{\text{trad}} - C^Q - K_{\text{op}}$ representa el ahorro por verificación.

Esta condición establece que el producto del ahorro unitario por el volumen de verificaciones debe exceder el costo anualizado de implementación. Contratos con alta λ son, ceteris paribus, mejores candidatos para adopción.

4. El Indicador de Reducción de Costos de Verificación Cuántica

4.1. Definición Formal del IRCVC

El Indicador de Reducción de Costos de Verificación Cuántica se define como la proporción de costos ahorrados relative a los costos totales bajo tecnología tradicional:

$$\text{IRCVC} = \frac{CT^{\text{trad}} - CT^Q}{CT^{\text{trad}}} = 1 - \frac{\lambda \cdot C^Q + K_A}{\lambda \cdot C^{\text{trad}}} \quad (7)$$

Reordenando términos:

$$\text{IRCVC} = \frac{\lambda \cdot \Delta C - K_A}{\lambda \cdot C^{\text{trad}}} = \frac{\Delta C}{C^{\text{trad}}} - \frac{K_A}{\lambda \cdot C^{\text{trad}}} \quad (8)$$

Esta formulación revela la estructura del indicador: un término positivo que captura la eficiencia ganada por verificación, menos un término de penalización que decrece con la frecuencia de verificaciones.

4.2. Propiedades del Indicador

El IRCVC posee varias propiedades analíticas relevantes:

Propiedad 1 (Rango): El IRCVC toma valores en $(-\infty, \rho_{\text{máx}})$ donde $\rho_{\text{máx}} = \Delta C / C^{\text{trad}}$ representa el límite cuando $\lambda \rightarrow \infty$ o $K_A \rightarrow 0$.

Propiedad 2 (Monotonidad): El IRCVC es estrictamente creciente en λ y ΔC , y estrictamente decreciente en K_A y C^{trad} .

Para verificar monotonidad:

$$\frac{\partial \text{IRCVC}}{\partial \lambda} = \frac{K_A}{(\lambda \cdot C^{\text{trad}})^2} > 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \text{IRCVC}}{\partial K_A} = -\frac{1}{\lambda \cdot C^{\text{trad}}} < 0 \quad (10)$$

Propiedad 3 (Umbral): Existe un valor crítico $\lambda^* = K_A / \Delta C$ tal que IRCVC es positivo si y solo si $\lambda > \lambda^*$.

Este umbral representa la frecuencia mínima de verificaciones requerida para justificar la inversión en comunicación cuántica. Contratos con frecuencia menor no generan retornos positivos.

4.3. Parametrización Normalizada

Para facilitar análisis comparativo, introducimos una parametrización normalizada. Sea:

$$\alpha = \frac{\Delta C}{C^{\text{trad}}} \quad (\text{tasa de reducción de costos}) \quad (11)$$

$$\beta = \frac{K_A}{\lambda \cdot C^{\text{trad}}} \quad (\text{carga relativa de inversión}) \quad (12)$$

El indicador se expresa como:

$$\text{IRCVC} = \alpha - \beta \quad (13)$$

Esta forma simple revela que el indicador es la diferencia entre la eficiencia ganada y la carga de inversión. El punto de indiferencia ocurre cuando $\alpha = \beta$, es decir, cuando la reducción proporcional de costos iguala la carga relativa de inversión.

4.4. Descomposición por Componentes

Expandiendo ΔC en términos de sus componentes:

$$\Delta C = (1 - \theta_T)C_T + (1 - \theta_A)C_A + (1 - \theta_M)C_M + (1 - \theta_F)C_F - K_{\text{op}} \quad (14)$$

El IRCVC puede descomponerse en contribuciones de cada componente:

$$\text{IRCVC} = \sum_{i \in \{T, A, M, F\}} \omega_i \cdot (1 - \theta_i) - \frac{K_{\text{op}}}{\lambda \cdot C^{\text{trad}}} - \frac{K_A}{\lambda \cdot C^{\text{trad}}} \quad (15)$$

donde $\omega_i = C_i/C^{\text{trad}}$ representa la participación del componente i en costos totales.

Esta descomposición permite identificar qué componentes contribuyen más al valor del indicador. Si ω_T es grande y θ_T pequeño, la contribución de transmisión segura domina el indicador.

5. Análisis Económico del Indicador

5.1. Heterogeneidad Contractual

Diferentes tipos de contratos bancarios presentan estructuras de costos de verificación heterogéneas. Consideremos tres categorías:

Contratos de alto volumen y baja complejidad: Préstamos personales estandarizados, tarjetas de crédito y cuentas corrientes. Estos contratos típicamente tienen alta λ pero

bajo C^{trad} por verificación. El IRCVC depende críticamente del volumen.

Contratos de medio volumen y complejidad moderada: Préstamos corporativos, líneas de crédito empresarial y servicios de tesorería. Presentan λ moderada y C^{trad} medio. El balance entre frecuencia y costos unitarios determina el indicador.

Contratos de bajo volumen y alta complejidad: Financiamiento estructurado, derivados OTC y sindicación de préstamos. Exhiben baja λ pero alto C^{trad} . La magnitud absoluta del ahorro por verificación es crítica.

Para cada categoría, el valor óptimo de λ que maximiza el IRCVC dado K_A fijo no existe (el indicador crece monótonamente con λ), pero existe un umbral mínimo λ^* debajo del cual la adopción no es rentable.

5.2. Economías de Escala en Implementación

La inversión K_0 puede presentar economías de escala si múltiples contratos comparten infraestructura cuántica. Sea N el número de contratos que utilizan la misma infraestructura. Si existe sharing perfecto, el costo por contrato es K_0/N .

El indicador para el contrato j bajo sharing es:

$$\text{IRCVC}_j = \alpha_j - \frac{K_A}{N \cdot \lambda_j \cdot C_j^{\text{trad}}} \quad (16)$$

El IRCVC agregado que captura el beneficio conjunto es:

$$\text{IRCVC}_{\text{agg}} = \frac{\sum_{j=1}^N (\lambda_j \cdot \Delta C_j) - K_A}{\sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot C_j^{\text{trad}}} \quad (17)$$

Este indicador agregado puede ser positivo incluso si algunos IRCVC individuales son negativos, justificando adopción conjunta. Las economías de escala generan externalidades positivas que pueden justificar coordinación entre instituciones o dentro de una institución grande.

5.3. Dinámica Temporal y Aprendizaje

Los parámetros del indicador evolucionan temporalmente. Específicamente:

Reducción de costos de implementación: La inversión $K_0(t)$ típicamente decrece con el tiempo debido a progreso tecnológico, siguiendo una curva de aprendizaje. Si $K_0(t) = K_0(0) \cdot e^{-\gamma t}$ donde $\gamma > 0$ representa la tasa de aprendizaje, el umbral crítico $\lambda^*(t)$ decrece exponencialmente.

Mejora en eficiencia: Los factores de reducción $\theta_i(t)$ pueden decrecer (mejorando eficiencia) conforme la tecnología madura. Esto incrementa $\Delta C(t)$, haciendo la adopción

más atractiva con el tiempo.

Consideraciones de timing: Un banco enfrenta la decisión de adoptar hoy versus esperar. El valor de esperar incluye beneficios de menor K_0 futuro y mayor ΔC futuro, pero implica pérdida de ahorros acumulados en el interim.

Sea $V_{\text{adoptar}}(t)$ el valor presente de adoptar en tiempo t y V_{esperar} el valor de esperar hasta $t + \Delta t$. La decisión óptima depende de la comparación de estos valores, incorporando descuento temporal y evolución de parámetros.

5.4. Implicaciones Competitivas

La adopción de comunicación cuántica puede generar ventajas competitivas. Si un banco reduce costos de verificación significativamente, puede:

Primero, ofrecer mejores términos contractuales a clientes (menores tasas, fees reducidos), capturando mayor market share.

Segundo, mejorar márgenes operativos manteniendo precios constantes, incrementando rentabilidad.

Tercero, entrar en segmentos de mercado previamente no rentables donde altos costos de verificación impedían operación.

En equilibrio de mercado, la distribución de beneficios entre bancos y clientes depende de la elasticidad de demanda y estructura competitiva. En mercados altamente competitivos, los beneficios se trasladan principalmente a clientes. En mercados concentrados, los bancos retienen mayor proporción.

5.5. Consideraciones Regulatorias

Los reguladores financieros pueden influenciar la adopción mediante:

Requerimientos de capital: Si comunicación cuántica mejora seguridad y reduce riesgo operacional, reguladores podrían permitir menores buffers de capital para bancos adoptantes. Sea ρ el requerimiento de capital como fracción de activos bajo riesgo. Si $\rho^Q < \rho^{\text{trad}}$, el beneficio adicional es:

$$B_{\text{reg}} = (\rho^{\text{trad}} - \rho^Q) \cdot \text{RWA} \cdot r_{\text{capital}} \quad (18)$$

donde RWA son activos ponderados por riesgo y r_{capital} es el costo de capital.

Este beneficio debe incorporarse en el IRCVC, incrementando α .

Mandatos de seguridad: Reguladores pueden establecer estándares mínimos de seguridad que favorezcan tecnología cuántica, efectivamente subsidiando adopción mediante reducción de costos de compliance.

6. Aplicaciones y Extensiones

6.1. Aplicación Ilustrativa

Consideremos un contrato de préstamo corporativo con las siguientes características:
Costos de verificación tradicionales anuales:

$$C_T = 5000 \text{ USD (transmisión segura)} \quad (19)$$

$$C_A = 3000 \text{ USD (autenticación)} \quad (20)$$

$$C_M = 7000 \text{ USD (monitoreo)} \quad (21)$$

$$C_F = 2000 \text{ USD (fraud detection)} \quad (22)$$

$$C^{\text{trad}} = 17000 \text{ USD} \quad (23)$$

Frecuencia de verificaciones: $\lambda = 12$ por año.

Factores de reducción bajo comunicación cuántica:

$$\theta_T = 0,2 \quad (80\% \text{ reducción en transmisión}) \quad (24)$$

$$\theta_A = 0,4 \quad (60\% \text{ reducción en autenticación}) \quad (25)$$

$$\theta_M = 0,7 \quad (30\% \text{ reducción en monitoreo}) \quad (26)$$

$$\theta_F = 0,6 \quad (40\% \text{ reducción en fraud detection}) \quad (27)$$

Costos operativos cuánticos: $K_{\text{op}} = 500$ USD por verificación.

Inversión inicial: $K_0 = 200000$ USD, tasa de descuento $r = 0,08$, duración $T = 10$ años.

Cálculo del indicador:

Costo por verificación bajo tecnología cuántica:

$$C^Q = 0,2(5000) + 0,4(3000) + 0,7(7000) + 0,6(2000) + 500 \quad (28)$$

$$= 1000 + 1200 + 4900 + 1200 + 500 = 8800 \text{ USD} \quad (29)$$

Ahorro por verificación:

$$\Delta C = 17000 - 8800 = 8200 \text{ USD} \quad (30)$$

Costo anualizado de inversión:

$$K_A = 200000 \cdot \frac{0,08(1,08)^{10}}{(1,08)^{10} - 1} \approx 29834 \text{ USD} \quad (31)$$

Costos totales anuales:

$$CT^{\text{trad}} = 12 \times 17000 = 204000 \text{ USD} \quad (32)$$

$$CT^Q = 12 \times 8800 + 29834 = 135434 \text{ USD} \quad (33)$$

El IRCVC es:

$$\text{IRCVC} = \frac{204000 - 135434}{204000} = \frac{68566}{204000} \approx 0,336 \text{ o } 33,6\% \quad (34)$$

Este resultado indica una reducción de 33.6% en costos totales de verificación, justificando claramente la inversión en comunicación cuántica para este tipo contractual.

6.2. Análisis de Sensibilidad

Variando λ manteniendo otros parámetros constantes:

Para $\lambda = 6$: IRCVC $\approx 0,06$ (6%)

Para $\lambda = 24$: IRCVC $\approx 0,42$ (42%)

El umbral crítico es $\lambda^* = 29834/8200 \approx 3,6$ verificaciones por año. Contratos con menos de 4 verificaciones anuales no justifican la inversión.

6.3. Extensiones del Indicador

Varias extensiones enriquecerían el análisis:

Incorporación de riesgo: Los costos y ahorros son estocásticos. Una versión robusta del IRCVC podría incorporar análisis de varianza y percentiles bajo diferentes escenarios.

Efectos de red: Si múltiples contrapartes adoptan comunicación cuántica, los beneficios se amplifican. Un IRCVC con efectos de red incorporaría externalidades positivas de adopción coordinada.

Opciones reales: La decisión de inversión puede modelarse como opción real con valor de esperar. Esto generaría un IRCVC ajustado por opcionalidad.

Dimensión sectorial: Diferentes sectores bancarios (retail, corporate, investment banking) presentan estructuras de costos distintas. Un IRCVC sectorial permitiría comparaciones cross-sector.

7. Conclusiones

Este artículo ha desarrollado el Indicador de Reducción de Costos de Verificación Cuántica, una herramienta analítica para evaluar la eficiencia económica de implementar comunicación cuántica en contratos bancarios. El análisis demuestra que la adopción

genera beneficios netos solo bajo condiciones específicas relacionadas con frecuencia de verificaciones, magnitud de reducción de costos y nivel de inversión requerida.

Los resultados principales establecen que el IRCVC depende críticamente de tres parámetros: la tasa de reducción de costos unitarios (α), la frecuencia de verificaciones (λ) y el costo anualizado de implementación (K_A). Existe un umbral mínimo de frecuencia $\lambda^* = K_A/\Delta C$ debajo del cual la inversión no se justifica. Contratos con alta frecuencia de verificaciones y elevados requisitos de seguridad emergen como candidatos prioritarios.

El análisis revela que economías de escala en implementación pueden justificar adopción coordinada incluso cuando el IRCVC individual de algunos contratos es negativo. Las externalidades positivas de sharing de infraestructura sugieren que instituciones grandes o consorcios de instituciones pequeñas tienen ventajas en adopción.

Las implicaciones para política económica incluyen el reconocimiento de que la evolución temporal de parámetros tecnológicos crea opciones de timing estratégicas. Bancos enfrentan trade-offs entre adoptar tempranamente versus esperar reducciones futuras en costos de implementación. Reguladores pueden influenciar este cálculo mediante ajustes en requerimientos de capital o mandatos de seguridad.

El marco desarrollado admite múltiples extensiones. La incorporación de incertidumbre y análisis de riesgo enriquecería el indicador al reconocer que costos y ahorros son estocásticos. El modelamiento de efectos de red capturaría externalidades de adopción coordinada entre múltiples instituciones. La perspectiva de opciones reales permitiría valorar la flexibilidad de timing en decisiones de inversión.

Una limitación del presente análisis es el tratamiento de parámetros como exógenos. En realidad, factores como θ_i pueden depender endógenamente de decisiones de inversión en capacitación y optimización de procesos. Futuras investigaciones podrían endogenizar estos parámetros mediante modelos de aprendizaje organizacional.

Otra dirección promisoriosa involucra el análisis de equilibrio competitivo cuando múltiples bancos deciden simultáneamente sobre adopción. La estructura de juego resultante podría generar equilibrios múltiples y trayectorias de adopción dependientes de path. La teoría de juegos evolutivos podría iluminar dinámicas de difusión tecnológica en el sector.

Finalmente, la integración con consideraciones de estabilidad sistémica merece atención. Si la correlación en adopción tecnológica genera dependencias comunes en infraestructura cuántica, esto podría crear nuevas fuentes de riesgo sistémico. Análisis de network topology y contagio tecnológico representan fronteras para investigación futura.

En conclusión, el IRCVC proporciona un marco estructurado para evaluación económica de comunicación cuántica en contratos bancarios. La herramienta traduce capacidades tecnológicas en métricas financieras accionables, facilitando decisiones de inversión informadas. La identificación sistemática de condiciones bajo las cuales la adopción genera

retornos positivos constituye la contribución central de este trabajo.

Referencias

- Aljaafari, M. (2023). Quantum computing for social business optimization: a practitioner's perspective. *Soft Computing*.
- Bova, F., Goldfarb, A., and Melko, R. G. (2021). Commercial applications of quantum computing. *EPJ Quantum Technology*, 8(1).
- de Wolf, R. (2017). The potential impact of quantum computers on society. *Ethics and Information Technology*, 19(4):271–276.
- Gilles, R. P. (2010). *The Cooperative Game Theory of Networks and Hierarchies*. Springer Berlin Heidelberg.
- Gupta, S. and Sharma, V. (2023). Effects of quantum computing on businesses. In *2023 4th International Conference on Intelligent Engineering and Management (ICIEM)*, pages 1–6. IEEE.
- Herman, D., Googin, C., Liu, X., Galda, A., Safro, I., Sun, Y., Pistoia, M., and Alexeev, Y. (2022). A survey of quantum computing for finance.
- Holahan, R. and Lubell, M. (2016). Collective action theory. In *Handbook on Theories of Governance*. Edward Elgar Publishing.
- How, M.-L. and Cheah, S.-M. (2023). Business renaissance: Opportunities and challenges at the dawn of the quantum computing era. *Businesses*, 3(4):585–605.
- Islam, M. A., Hasan, S. K., Priya, S. A., Asha, A. I., and Islam, N. M. (2024). The impact of quantum computing on financial risk management: A business perspective. *International Journal For Multidisciplinary Research*, 6(5).
- Mudhol, A. C. (2024). Integrating quantum computing into business analytics: Opportunities and challenges. *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*, pages 2451–2463.
- Mugel, S., Lizaso, E., and Orús, R. (2020). Use cases of quantum optimization for finance.
- Orús, R., Mugel, S., and Lizaso, E. (2019). Quantum computing for finance: Overview and prospects. *Reviews in Physics*, 4:100028.

Scholten, T. L., Williams, C. J., Moody, D., Mosca, M., Hurley, W., Zeng, W. J., Troyer, M., and Gambetta, J. (2024). Assessing the benefits and risks of quantum computers.

Wheatley Research Consultancy (2024). Quantum shifts: The societal implications of quantum computing on security, privacy, and the economy.