

Oportunidades de Liderazgo Femenino en la Gobernanza Ética de Tecnologías Cuánticas: Análisis desde la Teoría de Agencia y Stakeholders

Elena Patricia Rodríguez
elena.rodriguez@amlentia.org

Resumen

Las tecnologías cuánticas emergen como una de las disrupciones tecnológicas más significativas del siglo XXI, planteando desafíos éticos y de gobernanza sin precedentes. Este artículo examina las oportunidades y barreras para el liderazgo femenino en los marcos de gobernanza ética de estas tecnologías, empleando la teoría de agencia y la teoría de stakeholders como lentes analíticas. A partir de una revisión exhaustiva de la literatura sobre tecnologías cuánticas, ética tecnológica y género en STEM, se argumenta que la subrepresentación femenina en la gobernanza cuántica constituye un problema de agencia que genera asimetrías informativas y conflictos de interés, reduciendo la legitimidad y efectividad de los marcos regulatorios. Mediante la teoría de stakeholders, se demuestra que la inclusión de perspectivas femeninas en la toma de decisiones sobre tecnologías cuánticas no es solo una cuestión de equidad, sino un imperativo estratégico para garantizar que estos desarrollos tecnológicos respondan a las necesidades de toda la sociedad. El análisis revela que las mujeres enfrentan barreras estructurales específicas en el ecosistema cuántico, desde la educación hasta las posiciones de liderazgo, lo que limita su participación en la definición de normas éticas y políticas. Se proponen estrategias concretas para fomentar el liderazgo femenino en la gobernanza cuántica, incluyendo la democratización del acceso al conocimiento cuántico, la creación de redes de mentorías, y el diseño de políticas sensibles al género que reconozcan las contribuciones femeninas en la construcción de un futuro cuántico responsable y equitativo.

Palabras clave: Liderazgo femenino, Gobernanza ética, Tecnologías cuánticas, Teoría de agencia, Teoría de stakeholders

Códigos JEL: D82, J16, O33, O38

1. Introducción

La revolución cuántica está en marcha. Las tecnologías cuánticas de segunda generación, que incluyen la computación cuántica, las comunicaciones cuánticas, el sensoria-mento cuántico y la metrología cuántica, prometen transformar radicalmente múltiples sectores económicos y sociales [25,28]. Desde la optimización de sistemas energéticos hasta la simulación molecular para el desarrollo de nuevos fármacos, desde la criptografía cuántica que garantiza comunicaciones ultra-seguras hasta los sensores cuánticos que revolucionan la medicina diagnóstica, el impacto potencial de estas tecnologías es profundo y multidimensional [1, 16].

Sin embargo, esta promesa tecnológica viene acompañada de desafíos éticos, sociales y de gobernanza que requieren atención urgente. Como señalan [24] y [5], las tecnologías cuánticas no deben repetir los errores de implementación de tecnologías anteriores, donde las consideraciones éticas y sociales fueron relegadas a un segundo plano hasta que los impactos negativos ya se habían materializado. La historia de la revolución digital, con sus consecuencias imprevistas en términos de vigilancia, privacidad, desinformación y desigualdad digital, ofrece lecciones importantes [26].

En este contexto, la gobernanza ética de las tecnologías cuánticas emerge como un campo de estudio y práctica crítico. [10] introduce el concepto de Quantum-ELSPI (Ethical, Legal, Social and Policy Implications) como un metaparadigma que conecta la investigación en tecnologías cuánticas con las cuestiones que surgen de su introducción en la sociedad. [3] y [13] desarrollan el campo emergente de la ética cuántica, argumentando que se requiere un enfoque holístico que considere no solo los aspectos técnicos, sino también las dimensiones humanas, sociales y políticas de estas tecnologías.

Un aspecto crítico pero insuficientemente explorado en la literatura sobre gobernanza cuántica es el papel del género, y específicamente, las oportunidades y barreras para el liderazgo femenino en este dominio. A pesar de que las mujeres han realizado contribuciones fundamentales a la física cuántica desde sus inicios, su representación en la investigación cuántica contemporánea, en las empresas de tecnología cuántica, y crucialmente, en los órganos de gobernanza y toma de decisiones sobre estas tecnologías, permanece marcadamente baja. [27] revela que, en un análisis de más de 362.000 abstracts técnicos relacionados con tecnologías cuánticas, los frameworks de equidad, diversidad e inclusión (EDI) están completamente ausentes, al igual que la consideración de grupos marginalizados, incluyendo las mujeres.

Esta subrepresentación no es meramente una cuestión de equidad o justicia social, aunque estos argumentos son importantes por derecho propio. Desde una perspectiva de teoría de agencia, la exclusión de las mujeres de las estructuras de gobernanza cuántica constituye un problema de representación que genera asimetrías informativas, conflictos de

interés no resueltos, y una reducción en la calidad de la supervisión y control de los principales (la sociedad en general) sobre los agentes (investigadores, empresas y reguladores en el ecosistema cuántico) [7]. Desde la teoría de stakeholders, la falta de participación femenina significa que una parte sustancial de los stakeholders afectados por las tecnologías cuánticas carece de voz en la definición de cómo estas tecnologías deben desarrollarse y desplegarse [21].

Este artículo examina sistemáticamente las oportunidades y barreras para el liderazgo femenino en la gobernanza ética de tecnologías cuánticas, empleando las teorías de agencia y stakeholders como marcos analíticos complementarios. El objetivo es triple: primero, documentar y analizar las brechas de género existentes en el ecosistema cuántico; segundo, demostrar por qué estas brechas constituyen un problema sustantivo para la gobernanza efectiva y legítima de estas tecnologías; y tercero, proponer estrategias concretas para fomentar la participación y el liderazgo femenino en la construcción de un futuro cuántico ético y equitativo.

La estructura del artículo es la siguiente. La siguiente sección desarrolla el marco teórico, articulando cómo las teorías de agencia y stakeholders proporcionan lentes complementarias para entender la gobernanza de tecnologías cuánticas y el rol del género en ella. La tercera sección documenta empíricamente las brechas de género en tecnologías cuánticas y gobernanza. La cuarta sección analiza cómo el liderazgo femenino puede funcionar como un mecanismo de legitimidad y supervisión en la gobernanza cuántica. La quinta sección examina desafíos éticos específicos de las tecnologías cuánticas donde las perspectivas femeninas pueden aportar valor distintivo. La sexta sección propone estrategias para promover la participación femenina. Finalmente, la séptima sección concluye con reflexiones sobre el camino hacia adelante.

2. Marco Teórico: Teoría de Agencia y Stakeholders en el Contexto Cuántico

La gobernanza de tecnologías emergentes plantea desafíos únicos que requieren marcos teóricos robustos para su análisis. En esta sección, desarrollamos dos perspectivas complementarias: la teoría de agencia y la teoría de stakeholders, aplicándolas específicamente al contexto de las tecnologías cuánticas y al papel del género en su gobernanza.

La teoría de agencia, desarrollada inicialmente en el contexto de la economía corporativa, examina las relaciones donde una parte (el principal) delega autoridad a otra parte (el agente) para tomar decisiones en su nombre. El problema central de agencia surge cuando los intereses del agente divergen de los del principal, y cuando existe asimetría informativa que impide al principal monitorear perfectamente las acciones del agente. En el

contexto de tecnologías cuánticas, podemos identificar múltiples relaciones de agencia: la sociedad en general actúa como principal, delegando en científicos, empresas tecnológicas, reguladores y formuladores de políticas la autoridad para desarrollar, desplegar y regular estas tecnologías [18].

Varios problemas de agencia emergen en este contexto. Primero, existe una asimetría informativa fundamental: el conocimiento sobre tecnologías cuánticas está concentrado en una élite técnica relativamente pequeña, mientras que los impactos de estas tecnologías afectarán a toda la sociedad [15, 24]. Esta asimetría se agrava cuando los tomadores de decisiones son homogéneos en términos de género, raza, clase y geografía, ya que carecen de la experiencia vivida necesaria para anticipar cómo las tecnologías cuánticas afectarán de manera diferencial a diversos grupos sociales.

Segundo, pueden existir conflictos de interés entre los agentes y los principales. Por ejemplo, las empresas de tecnología cuántica pueden priorizar la velocidad de comercialización sobre consideraciones éticas rigurosas, o los gobiernos pueden enfatizar aplicaciones militares de tecnologías cuánticas a expensas de aplicaciones para el bien social [11, 23]. Cuando los órganos de gobernanza carecen de diversidad de género, es menos probable que estos conflictos de interés sean identificados y desafiados, ya que existe una mayor probabilidad de pensamiento grupal y captura regulatoria.

Tercero, el problema de selección adversa puede ocurrir si los mecanismos de gobernanza son diseñados de manera que atraigan desproporcionadamente a ciertos tipos de actores mientras excluyen a otros. Si las estructuras de gobernanza cuántica son percibidas como dominadas por hombres, jerárquicas y excluyentes, esto puede desalentar la participación de mujeres calificadas, exacerbando el problema de representación [21].

La teoría de agencia sugiere que la diversidad de género en la gobernanza puede funcionar como un mecanismo de supervisión y control. Cuando los órganos de gobernanza incluyen diversidad de perspectivas, es más probable que detecten sesgos, identifiquen riesgos no anticipados, y desafíen supuestos no examinados. La investigación en gobierno corporativo ha demostrado consistentemente que la diversidad de género en juntas directivas mejora la calidad de la supervisión y reduce la probabilidad de escándalos y fraudes. Estos hallazgos son directamente relevantes para la gobernanza de tecnologías cuánticas [6].

La teoría de stakeholders ofrece una perspectiva complementaria. Desarrollada por Freeman y otros, esta teoría sostiene que las organizaciones deben considerar los intereses no solo de los accionistas, sino de todos los stakeholders: grupos o individuos que afectan o son afectados por las actividades de la organización. En el contexto de tecnologías cuánticas, los stakeholders incluyen investigadores, empresas, gobiernos, trabajadores cuyos empleos pueden ser afectados por la automatización cuántica, comunidades que pueden

beneficiarse o ser perjudicadas por aplicaciones cuánticas específicas, generaciones futuras que heredarán las consecuencias de decisiones tomadas hoy, y la sociedad en general [10].

Un principio central de la teoría de stakeholders es que la legitimidad organizacional depende de que todos los stakeholders significativos tengan voz en los procesos de toma de decisiones. Cuando las mujeres, que constituyen aproximadamente la mitad de la población global, están excluidas o subrepresentadas en la gobernanza de tecnologías cuánticas, esto representa una falla fundamental de legitimidad. Las decisiones tomadas en ausencia de participación femenina significativa carecen de la autoridad moral para ser consideradas como representativas de los intereses sociales más amplios [12].

Además, la teoría de stakeholders sugiere que la inclusión de perspectivas diversas no solo es éticamente deseable, sino estratégicamente ventajosa. La investigación ha demostrado que grupos diversos son mejores en la resolución de problemas complejos, más innovadores, y menos propensos a puntos ciegos cognitivos. Dado que las tecnologías cuánticas plantean desafíos de gobernanza de complejidad sin precedentes, que abarcan dimensiones técnicas, éticas, legales, sociales, económicas y políticas, la diversidad de perspectivas, incluyendo el género, es esencial para una gobernanza efectiva [9, 18].

Un aspecto crítico es que diferentes stakeholders pueden tener diferentes relaciones con el riesgo y diferentes horizontes temporales. La investigación sugiere que las mujeres, en promedio, tienden a ser más aversas al riesgo y más orientadas al largo plazo en comparación con los hombres. Esto no refleja una inferioridad cognitiva, sino diferencias en experiencias vividas, responsabilidades de cuidado, y posicionamiento social. En el contexto de tecnologías cuánticas, donde las decisiones tomadas hoy tendrán consecuencias que se desarrollarán durante décadas, esta orientación hacia el largo plazo puede ser precisamente lo que se necesita para garantizar un desarrollo responsable [7].

Integrando las teorías de agencia y stakeholders, podemos ver que la subrepresentación femenina en la gobernanza cuántica es problemática en múltiples niveles: crea problemas de agencia al reducir la efectividad de la supervisión, reduce la legitimidad de los marcos de gobernanza al excluir stakeholders significativos, y disminuye la calidad de la toma de decisiones al limitar la diversidad de perspectivas. Por el contrario, promover el liderazgo femenino en la gobernanza cuántica puede servir como un mecanismo para abordar problemas de agencia, mejorar la legitimidad stakeholder, y aumentar la efectividad de la gobernanza.

Esta perspectiva teórica integrada proporciona la base para el análisis empírico que sigue, donde examinamos las brechas de género específicas en el ecosistema cuántico y exploramos cómo el liderazgo femenino puede contribuir a una gobernanza más efectiva y legítima de estas tecnologías transformadoras.

3. Brecha de Género en Tecnologías Cuánticas y Gobernanza

Para entender las oportunidades y barreras para el liderazgo femenino en la gobernanza de tecnologías cuánticas, es esencial primero documentar la magnitud y naturaleza de las brechas de género existentes en el ecosistema cuántico más amplio. Estas brechas se manifiestan a lo largo de toda la pipeline: desde la educación en ciencias cuánticas hasta la investigación, el emprendimiento, y finalmente, las posiciones de liderazgo en organismos de gobernanza y formulación de políticas.

La subrepresentación femenina en campos STEM (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas) es un fenómeno bien documentado, y la física cuántica no es una excepción. A pesar de que mujeres como Emmy Noether, Lise Meitner, y más recientemente, mujeres ganadoras del Premio Nobel en física como Donna Strickland, han realizado contribuciones fundamentales, las mujeres permanecen significativamente subrepresentadas. Los datos globales muestran que las mujeres constituyen aproximadamente el veinte por ciento de los graduados en física a nivel de doctorado, y esta proporción disminuye aún más en posiciones académicas senior y en liderazgo corporativo en empresas de tecnología cuántica [17].

Esta disparidad tiene raíces profundas en los sistemas educativos. La investigación muestra que los estereotipos de género sobre las habilidades matemáticas y científicas emergen temprano en la educación, desalentando a las niñas de seguir carreras en física y matemáticas. La falta de modelos a seguir femeninos en estas disciplinas refuerza estos estereotipos. [15] argumenta que existe una necesidad crítica de desarrollar quantum literacy (alfabetización cuántica) de manera inclusiva, garantizando que las mujeres y otros grupos subrepresentados tengan acceso equitativo al conocimiento cuántico desde las etapas tempranas de la educación.

A medida que avanzamos en la pipeline educativa y profesional, las brechas se amplían, un fenómeno conocido como el "leaky pipeline". Las mujeres enfrentan barreras específicas en la transición de estudiantes a investigadoras, y de investigadoras a líderes. Estas barreras incluyen sesgos implícitos en la evaluación de méritos académicos, culturas laborales que penalizan las responsabilidades de cuidado (que recaen desproporcionadamente en las mujeres), falta de mentorías y redes profesionales, y en algunos casos, acoso y discriminación directa [27].

En el sector corporativo de tecnologías cuánticas, la situación es igualmente preocupante. Las startups y empresas establecidas en el espacio cuántico tienden a ser fundadas y lideradas predominantemente por hombres. La investigación sobre emprendimiento tecnológico muestra que las mujeres enfrentan barreras sistemáticas en el acceso a finan-

ciamiento de capital de riesgo, mentoría, y redes profesionales. Cuando las empresas de tecnología cuántica carecen de diversidad de género en sus equipos fundadores y de liderazgo, esto se refleja inevitablemente en los tipos de productos que desarrollan, los mercados que priorizan, y las consideraciones éticas que incorporan (o no) en sus diseños [4].

Quizás más crítico desde la perspectiva de este artículo es la subrepresentación femenina en los órganos de gobernanza, formulación de políticas, y ética cuántica. Los comités que desarrollan estándares técnicos para tecnologías cuánticas, los organismos regulatorios que supervisan su despliegue, los grupos de expertos que asesoran a gobiernos sobre políticas cuánticas, y los comités de ética que examinan implicaciones sociales, todos tienden a ser dominados por hombres. [27] revela que de los 200 términos sociales analizados en más de 362.000 abstracts relacionados con tecnologías cuánticas, el término "social" apareció en solo 0.24 por ciento de los abstracts, y los frameworks de equidad, diversidad e inclusión estaban completamente ausentes.

Esta ausencia no es accidental; refleja prioridades y valores específicos dentro de la comunidad cuántica. [24] argumenta que el framing actual de la teoría cuántica como "enigmática" exclusivamente técnica crea barreras para la participación pública más amplia, incluyendo la participación de grupos subrepresentados. Cuando las tecnologías cuánticas son presentadas como dominio exclusivo de una élite técnica, esto desalienta la participación de stakeholders diversos, incluyendo mujeres que podrían aportar perspectivas valiosas desde campos como la ética, las ciencias sociales, el derecho, y las humanidades.

La democratización de las tecnologías cuánticas, un concepto explorado por [21], es crucial para abordar estas brechas. Los autores analizan la democratización a través de tres teorías de democracia (participativa, representativa y deliberativa), concluyendo que los esfuerzos actuales de democratización en el campo cuántico son necesarios pero insuficientes. Las empresas de computación cuántica usan el concepto de democratización de manera estrecha, enfocándose principalmente en el acceso a hardware cuántico a través de la nube, mientras ignoran dimensiones más amplias de participación democrática en la gobernanza y dirección del desarrollo cuántico.

Para que la gobernanza de tecnologías cuánticas sea verdaderamente efectiva y legítima, debe incluir la participación significativa de mujeres en todos los niveles de toma de decisiones. Esto requiere abordar las barreras estructurales que actualmente limitan esta participación. [7] propone un framework anticipatorio para preparar la sociedad para la era cuántica, que incluye cinco dimensiones: desmistificación, contextualización, compromiso, regulación y posicionamiento. Cada una de estas dimensiones tiene implicaciones de género que deben ser explícitamente consideradas.

La desmistificación requiere hacer el conocimiento cuántico accesible de maneras que

no perpetúen estereotipos de género sobre quién "pertenece" a la física. La contextualización implica desarrollar un ambiente socio-técnico que sea acogedor para mujeres y otros grupos subrepresentados. El compromiso significa involucrar activamente a stakeholders diversos, incluyendo organizaciones de mujeres en STEM. La regulación debe incorporar perspectivas de género en el desarrollo de políticas. Y el posicionamiento a nivel de diplomacia cuántica internacional debe asegurar que las voces femeninas sean escuchadas en foros globales sobre gobernanza cuántica [23].

Las consecuencias de las brechas de género actuales son significativas. Cuando las mujeres están ausentes de las conversaciones sobre el futuro de las tecnologías cuánticas, existe un riesgo real de que estas tecnologías repliquen y amplifiquen sesgos y desigualdades de género existentes. Por ejemplo, si los algoritmos cuánticos son desarrollados y desplegados sin consideración de sus impactos diferenciales en mujeres y hombres, podrían perpetuar discriminaciones en áreas como el empleo, el acceso al crédito, la justicia criminal, y la atención médica [6].

Más fundamentalmente, la exclusión de las mujeres de la gobernanza cuántica representa una pérdida de talento, perspectivas e innovación que la humanidad no puede permitirse. Los desafíos que enfrentamos, desde el cambio climático hasta la desigualdad global, son demasiado complejos para ser abordados por cualquier grupo homogéneo, sin importar cuán brillante sea. [23] argumenta que garantizar que la computación cuántica beneficie a toda la humanidad requiere tres prioridades: impacto (desarrollar soluciones para problemas globales críticos), uso responsable (proteger contra uso malicioso), y acceso (democratizar el potencial de crecimiento económico). Cada una de estas prioridades se beneficia fundamentalmente de la inclusión de perspectivas femeninas.

En resumen, las brechas de género en tecnologías cuánticas y su gobernanza son sustanciales y multifacéticas, extendiéndose desde la educación hasta el liderazgo. Abordar estas brechas no es solo una cuestión de justicia, sino un imperativo estratégico para garantizar que las tecnologías cuánticas se desarrollen de manera que sirvan los intereses de toda la humanidad. Las siguientes secciones exploran cómo el liderazgo femenino puede contribuir específicamente a una gobernanza más efectiva y legítima de estas tecnologías transformadoras.

4. Liderazgo Femenino como Mecanismo de Legitimidad y Supervisión

Habiendo documentado las brechas de género en el ecosistema cuántico, ahora examinamos cómo el liderazgo femenino puede funcionar como un mecanismo crucial para mejorar tanto la legitimidad como la efectividad de la gobernanza de tecnologías cuánticas.

cas. Esta sección articula tres argumentos interrelacionados: primero, que el liderazgo femenino mejora la legitimidad stakeholder de la gobernanza cuántica; segundo, que fortalece los mecanismos de supervisión y control en relaciones de agencia; y tercero, que aporta perspectivas distintivas que enriquecen la calidad de la toma de decisiones.

La legitimidad es un concepto fundamental en la teoría de la gobernanza. Un sistema de gobernanza es legítimo cuando los stakeholders afectados lo reconocen como apropiado y autorizado para tomar decisiones en su nombre. La legitimidad descansa en múltiples pilares: legitimidad de input (inclusión de stakeholders en procesos de toma de decisiones), legitimidad de throughput (transparencia y equidad de los procesos), y legitimidad de output (efectividad en lograr objetivos deseados). El liderazgo femenino contribuye a cada una de estas dimensiones [21].

En términos de legitimidad de input, la inclusión de mujeres en órganos de gobernanza cuántica garantiza que aproximadamente la mitad de la población global tenga representación en decisiones que afectarán sus vidas. Esto es particularmente importante dado que las tecnologías cuánticas tendrán impactos diferenciales en mujeres y hombres. Por ejemplo, [1] y [14] discuten cómo la optimización cuántica de sistemas energéticos puede transformar el acceso a energía, lo cual tiene implicaciones específicas de género dado que las mujeres en países en desarrollo frecuentemente son las principales responsables de la recolección de combustible y energía para el hogar.

Las investigaciones sobre gobierno corporativo demuestran que la diversidad de género en juntas directivas mejora la calidad de la supervisión. Las directoras tienden a hacer más preguntas, ser más diligentes en la revisión de documentos, y estar menos propensas al pensamiento grupal. Estos hallazgos son directamente aplicables a la gobernanza de tecnologías cuánticas. Cuando los comités de ética cuántica, los organismos regulatorios, y los grupos de expertos incluyen mujeres, es más probable que examinen críticamente supuestos, identifiquen riesgos no anticipados, y desafíen narrativas dominantes sobre el desarrollo tecnológico [3].

[6] argumenta que el desarrollo de un framework ético comprensivo para tecnologías cuánticas requiere esfuerzos coordinados entre stakeholders de múltiples sectores: tecnología, ética, política y gobernanza. El liderazgo femenino puede facilitar esta coordinación al aportar habilidades de colaboración, construcción de consensos, y sensibilidad a dinámicas de poder que son esenciales para navegar la complejidad de la gobernanza multi-stakeholder.

Desde la perspectiva de la teoría de agencia, el liderazgo femenino funciona como un mecanismo de control que reduce las asimetrías informativas y mitiga conflictos de interés. Una función crítica de cualquier sistema de gobernanza es supervisar a los agentes (en este caso, investigadores y empresas de tecnología cuántica) para asegurar que actúen en

interés de los principales (la sociedad). Esta supervisión requiere independencia, diligencia y disposición para cuestionar el status quo. La investigación sugiere que las mujeres en posiciones de liderazgo a menudo aportan estas cualidades de manera distintiva [9].

Varios mecanismos explican por qué el liderazgo femenino puede mejorar la supervisión. Primero, las mujeres como grupo minoritario en entornos técnicos pueden estar menos sujetas a presiones de conformidad y más dispuestas a plantear preguntas difíciles. Segundo, la investigación sugiere que las mujeres, en promedio, tienden a ser más aversas al riesgo, lo cual puede ser ventajoso en el contexto de tecnologías cuánticas donde los riesgos son significativos y las consecuencias a largo plazo son inciertas. Tercero, las mujeres pueden aportar diferentes redes y fuentes de información, reduciendo las asimetrías informativas que caracterizan las relaciones de agencia [18].

Es importante enfatizar que estos argumentos no descansan en esencialismo de género, la idea de que las mujeres son inherentemente diferentes de los hombres en formas fijas y biológicamente determinadas. Más bien, reconocen que las experiencias vividas de las mujeres en sociedades marcadas por desigualdades de género las posicionan para ver aspectos de la realidad social que pueden ser menos visibles para los hombres en posiciones de privilegio. Esta perspectiva situada es valiosa para la gobernanza de tecnologías que tendrán impactos profundos y diferenciales en toda la sociedad.

[9] proponen un roadmap práctico para la primera ola de aplicaciones cuánticas que reconoce explícitamente que mejores políticas y normas éticas necesitan ser sensibles al contexto de despliegue y casos de uso. El liderazgo femenino puede contribuir a este enfoque contextual al aportar atención a cómo las tecnologías cuánticas afectan de manera diferencial a diversos grupos sociales, incluyendo mujeres en diferentes posiciones socio-económicas, geográficas y culturales.

Un aspecto crítico del liderazgo femenino en gobernanza cuántica es su potencial para desafiar el tecno-solucionismo, la tendencia a ver las tecnologías como soluciones neutrales a problemas sociales complejos. [24] argumenta que existe una urgencia renovada de hacer la teoría cuántica comprensible, precisamente porque el framing actual de lo cuántico como enigmático y exclusivamente técnico impide el debate social informado. Las mujeres líderes, particularmente aquellas con formación en ciencias sociales, humanidades y ética, pueden ayudar a traducir debates técnicos sobre tecnologías cuánticas en términos que sean accesibles y relevantes para stakeholders más amplios.

La investigación sobre liderazgo femenino en contextos corporativos y políticos muestra consistentemente que las mujeres tienden a adoptar estilos de liderazgo más colaborativos, inclusivos y orientados a las relaciones, en contraste con estilos más jerárquicos y orientados a transacciones. En el contexto de gobernanza cuántica, donde la coordinación entre múltiples stakeholders con diferentes perspectivas y agendas es esencial, estos estilos de

liderazgo pueden ser particularmente valiosos [13].

[23] identifican tres prioridades estratégicas para la computación cuántica: impacto, uso responsable y acceso. El liderazgo femenino puede contribuir significativamente a cada prioridad. En términos de impacto, las mujeres líderes pueden ayudar a garantizar que las aplicaciones cuánticas se dirijan a problemas que afectan desproporcionadamente a mujeres, como la salud materna, la violencia de género, y la pobreza energética. En términos de uso responsable, pueden fortalecer los marcos de gobernanza para prevenir usos maliciosos. Y en términos de acceso, pueden abogar por políticas que democratizen el conocimiento y las oportunidades cuánticas.

Sin embargo, es crucial reconocer que simplemente incluir mujeres en posiciones de liderazgo no es suficiente si operan dentro de estructuras institucionales que limitan su agencia y perpetúan sesgos de género. El liderazgo femenino efectivo requiere no solo la presencia de mujeres, sino también transformaciones en las culturas organizacionales, estructuras de poder y normas institucionales que permitan a las mujeres ejercer influencia real. [21] señalan que los esfuerzos actuales de democratización en tecnologías cuánticas son necesarios pero insuficientes, argumentando que se requiere mayor reflexividad y responsividad de los actores en el campo.

Finalmente, el liderazgo femenino en gobernanza cuántica tiene un valor simbólico importante más allá de sus contribuciones sustantivas. Las mujeres líderes visibles en este espacio sirven como modelos a seguir para las niñas y mujeres jóvenes que consideran carreras en física cuántica y campos relacionados. Esto puede ayudar a abordar las brechas de género en la pipeline educativa discutidas en la sección anterior, creando un círculo virtuoso donde mayor representación femenina en liderazgo lleva a mayor participación femenina en el campo más amplio [15].

En resumen, el liderazgo femenino en gobernanza de tecnologías cuánticas no es simplemente una cuestión de equidad, aunque esto sería suficiente justificación. Es también un mecanismo crucial para mejorar la legitimidad, fortalecer la supervisión, y enriquecer la calidad de la toma de decisiones. La siguiente sección examina desafíos éticos específicos de las tecnologías cuánticas donde las perspectivas femeninas pueden aportar valor distintivo.

5. Desafíos Éticos y el Rol de las Mujeres en la Toma de Decisiones

Las tecnologías cuánticas plantean desafíos éticos únicos que requieren consideración cuidadosa y deliberación inclusiva. Esta sección examina varios de estos desafíos éticos y articula cómo las perspectivas femeninas pueden contribuir a su abordaje efectivo. Los

desafíos discutidos incluyen la seguridad y privacidad en la era cuántica, los impactos laborales de la automatización cuántica, la equidad en el acceso a beneficios cuánticos, la sostenibilidad ambiental del desarrollo cuántico, y las implicaciones militares y de seguridad de estas tecnologías.

El desafío más discutido de las tecnologías cuánticas es su impacto potencial en la criptografía y la seguridad. Los computadores cuánticos suficientemente poderosos podrán romper muchos de los sistemas de encriptación que actualmente protegen información sensible, desde comunicaciones personales hasta secretos de estado. [26] explora las implicaciones societales de la computación cuántica en seguridad, privacidad y economía, argumentando que la quebra de métodos convencionales de encriptación representa un riesgo existencial para la infraestructura digital moderna.

Las decisiones sobre cómo abordar este desafío, particularmente sobre el ritmo de desarrollo de criptografía post-cuántica y su implementación, tienen implicaciones profundas para la privacidad individual y la seguridad colectiva. [12] argumenta que las tecnologías cuánticas deben promover derechos humanos en lugar de socavarlos, y establece una agenda específica para garantizar desarrollo y despliegue responsables. Las perspectivas femeninas pueden ser particularmente valiosas aquí, dado que las mujeres son frecuentemente afectadas desproporcionadamente por violaciones de privacidad y vigilancia, desde acoso en línea hasta violencia digital de género.

Un segundo desafío ético crítico son los impactos laborales de las tecnologías cuánticas. [1] y [14] discuten cómo la optimización cuántica puede transformar sistemas de energía, logística, finanzas y otros sectores, potencialmente desplazando trabajadores mientras crea nuevas oportunidades. La automatización habilitada por computación cuántica podría acelerar tendencias ya preocupantes hacia la desigualdad laboral y de ingresos. [22] demuestran capacidad práctica de computación cuántica para resolver problemas complejos de programación de tareas laborales, sugiriendo transformaciones inminentes en gestión de la fuerza de trabajo.

Las decisiones sobre cómo gestionar esta transición tecnológica tienen dimensiones de género significativas. Las mujeres están concentradas en ciertos sectores que podrían ser afectados desproporcionadamente por la automatización cuántica, como servicios administrativos y trabajo de atención. Al mismo tiempo, las mujeres están subrepresentadas en los nuevos empleos técnicos que serán creados en el ecosistema cuántico. [17] analiza la fuerza de trabajo necesaria para desarrollar software cuántico, pero no aborda explícitamente cuestiones de género en esta transición laboral.

[19] proponen un roadmap para adopción ética y escalable de tecnologías cuánticas que considera explícitamente transiciones de fuerza de trabajo y equidad digital. El liderazgo femenino en la formulación de políticas puede ayudar a garantizar que estas transiciones

sean gestionadas de manera que no exacerben desigualdades de género existentes, sino que creen oportunidades para mayor equidad.

Un tercer desafío ético es la equidad en el acceso a beneficios de tecnologías cuánticas. Existe un riesgo real de que estas tecnologías amplíen la brecha entre países desarrollados y en desarrollo, entre ricos y pobres dentro de países, y entre grupos privilegiados y marginalizados. [21] argumentan que la democratización de tecnologías cuánticas requiere no solo acceso técnico, sino participación significativa en la configuración de su desarrollo y despliegue.

Las perspectivas femeninas son cruciales para abordar estas cuestiones de equidad porque las mujeres constituyen la mayoría de las personas en situación de pobreza global y frecuentemente carecen de acceso a tecnologías y oportunidades educativas. [8] demuestran aplicaciones prácticas de computación cuántica para resiliencia climática y desafíos de sostenibilidad, incluyendo gestión de residuos, prevención de desastres y desarrollo de materiales para captura de carbono. Las mujeres, particularmente en países en desarrollo, son afectadas desproporcionadamente por el cambio climático y desastres naturales, haciendo su participación en decisiones sobre priorización de aplicaciones cuánticas especialmente importante.

El cuarto desafío ético es la sostenibilidad ambiental del desarrollo cuántico mismo. [2] alertan que los impactos ambientales de la computación cuántica, incluyendo huella de carbono, generación de residuos electrónicos, uso de minerales raros, consumo de agua y energía, permanecen ampliamente desconocidos. Proponen un framework de computación cuántica consciente del carbono que proporciona metodología para calcular la huella total del ciclo de vida completo de plataformas cuánticas.

Las decisiones sobre estándares de sostenibilidad para tecnologías cuánticas tienen implicaciones intergeneracionales. La investigación sugiere que las mujeres tienden a tener mayor preocupación por cuestiones ambientales y mayor orientación hacia la sostenibilidad a largo plazo. Esta orientación puede ser invaluable para garantizar que el entusiasmo por las capacidades de las tecnologías cuánticas no eclipse consideraciones sobre sus costos ambientales y sostenibilidad a largo plazo [19].

El quinto desafío ético, quizás el más espinoso, son las implicaciones militares y de seguridad de las tecnologías cuánticas. [11] proporciona una revisión comprensiva de aplicaciones militares cuánticas, argumentando que las tecnologías cuánticas introducen nuevas capacidades que llevan a "guerra cuántica" que requiere nuevas estrategias militares, doctrinas, políticas y ética. Las tecnologías cuánticas pueden mejorar sistemas de vigilancia, comunicaciones militares, sensores, y potencialmente armas.

Las decisiones sobre regulación, control de exportaciones, transparencia y cooperación internacional en tecnologías cuánticas militares tienen profundas implicaciones para la paz

y seguridad globales. [23] argumentan que una de las tres prioridades estratégicas para computación cuántica debe ser proteger contra uso malicioso acelerando el despliegue de criptografía quantum-safe y desarrollando procesos de gobernanza. El liderazgo femenino en estos debates puede aportar perspectivas importantes sobre priorización de aplicaciones para el bien social sobre aplicaciones militares, construcción de confianza internacional, y énfasis en seguridad humana sobre seguridad nacional estrechamente definida.

La investigación sobre género y paz muestra que las mujeres en negociaciones de paz y procesos de toma de decisiones sobre seguridad tienden a priorizar enfoques más amplios de seguridad que incluyen seguridad económica, ambiental y humana, en lugar de definiciones estrictamente militares. Esta perspectiva más amplia es precisamente lo que se necesita en debates sobre gobernanza de tecnologías cuánticas con aplicaciones tanto civiles como militares [29].

Un tema que atraviesa todos estos desafíos éticos es la necesidad de anticipación: identificar y abordar riesgos potenciales antes de que se materialicen. [7] desarrollan un framework anticipatorio para preparar la sociedad para la era cuántica, argumentando que las lecciones de revoluciones tecnológicas anteriores demuestran la importancia de la preparación proactiva en lugar de la reacción después del hecho. Las perspectivas femeninas pueden contribuir a esta anticipación al plantear preguntas sobre quién podría ser perjudicado por aplicaciones específicas, qué salvaguardias son necesarias, y cómo garantizar que los beneficios sean ampliamente compartidos.

[13] y [3] introducen el Quantum Ethics Project (QEP) y reportan el desarrollo de uno de los primeros cursos completos sobre ética e impactos sociales de tecnología cuántica. Este tipo de educación es crucial para formar la próxima generación de líderes cuánticos con sensibilidad ética. Sin embargo, es esencial que estos programas educativos incorporen explícitamente perspectivas de género y garanticen la participación de mujeres y otros grupos subrepresentados.

Finalmente, abordar estos desafíos éticos requiere no solo análisis técnico, sino también deliberación democrática. [18] desarrollan una evaluación tecnológica hermenéutica de tecnologías cuánticas, argumentando que la aceptación social y la confianza en tecnologías cuánticas requieren comunicación efectiva y compromiso público. El liderazgo femenino puede facilitar este compromiso al servir como puente entre comunidades técnicas y públicos más amplios, traduciendo debates complejos en términos accesibles y garantizando que las voces de stakeholders diversos sean escuchadas.

En resumen, las tecnologías cuánticas plantean desafíos éticos profundos y multifacéticos que requieren la participación de perspectivas diversas, incluyendo crucialmente las perspectivas femeninas. La siguiente sección propone estrategias concretas para promover esta participación y fomentar el liderazgo femenino en la gobernanza de tecnologías

cuánticas.

6. Estrategias para Promover la Participación Femenina en Gobernanza Cuántica

Habiendo establecido la importancia del liderazgo femenino en la gobernanza de tecnologías cuánticas y documentado las barreras existentes, esta sección propone estrategias concretas para fomentar la participación y el liderazgo femenino. Estas estrategias operan en múltiples niveles: individual, organizacional, sectorial y de políticas públicas, reconociendo que abordar brechas de género sistémicas requiere intervenciones en múltiples puntos del sistema.

A nivel educativo, es fundamental comenzar temprano. [15] proponen el concepto de quantum literacy como medio para abordar la necesidad de investigación transdisciplinar en respuesta a problemas complejos de sostenibilidad global. Argumentan que la alfabetización cuántica debe ser desarrollada de manera inclusiva, garantizando que niñas y mujeres jóvenes tengan acceso equitativo al conocimiento cuántico desde las primeras etapas educativas. Esto requiere intervenciones específicas para contrarrestar estereotipos de género sobre habilidades en física y matemáticas.

Las estrategias educativas efectivas incluyen: incorporar ejemplos y aplicaciones que resuenen con intereses diversos, no solo los tradicionalmente asociados con niños; destacar contribuciones históricas de mujeres a la física cuántica; utilizar métodos de enseñanza colaborativos que han demostrado ser efectivos para estudiantes femeninas; y proporcionar experiencias prácticas tempranas con tecnologías cuánticas que desmitifiquen el campo. [24] enfatiza la urgencia de hacer la teoría cuántica comprensible, argumentando que el framing actual de lo cuántico como enigmático crea barreras innecesarias para la participación amplia.

A nivel universitario y de posgrado, se necesitan programas específicos de mentorías y redes de apoyo para mujeres en física cuántica y campos relacionados. La investigación muestra consistentemente que las mentorías son cruciales para la retención y avance de mujeres en campos STEM. Los programas de mentoría efectivos emparejan a mujeres estudiantes y jóvenes profesionales con mujeres líderes establecidas en el campo cuántico, proporcionando modelos a seguir, orientación profesional, y apoyo emocional para navegar culturas laborales que pueden ser hostiles o excluyentes [17].

Las organizaciones profesionales en física cuántica y campos relacionados tienen un papel crucial que desempeñar. Pueden establecer y hacer cumplir códigos de conducta que prohíban el acoso y la discriminación, implementar políticas de igualdad de oportunidades en conferencias y comités (como reglas de "dos no" que requieren representación de al

menos dos mujeres en cualquier panel), y recopilar y publicar datos desagregados por género sobre participación en sus actividades. La transparencia en estos datos es esencial para el seguimiento de progreso y la responsabilidad [27].

En el sector corporativo de tecnologías cuánticas, se necesitan intervenciones en múltiples frentes. Las empresas de tecnología cuántica deben establecer objetivos específicos y medibles para la diversidad de género en sus equipos de investigación, desarrollo y liderazgo. Deben implementar prácticas de contratación diseñadas para reducir sesgos implícitos, como revisiones ciegas de currículums, paneles de entrevistas diversos, y criterios de evaluación estandarizados. Las políticas laborales deben ser diseñadas para ser compatibles con responsabilidades de cuidado, incluyendo horarios flexibles, trabajo remoto, y licencias parentales generosas para todos los géneros [4].

Los inversores de capital de riesgo y otros financiadores de startups cuánticas tienen un poder significativo para promover la diversidad de género. Pueden priorizar inversiones en equipos fundadores diversos, reconociendo la evidencia de que la diversidad mejora el desempeño empresarial. Pueden establecer criterios de diversidad como parte de sus procesos de due diligence. Y pueden proporcionar capital y mentoría específicamente dirigidos a mujeres emprendedoras en el espacio cuántico, abordando las barreras sistemáticas que enfrentan en el acceso a financiamiento [20].

A nivel de organismos de gobernanza y formulación de políticas, se necesitan acciones deliberadas para garantizar la representación femenina. Los gobiernos que establecen comités de expertos en tecnologías cuánticas, organismos regulatorios, y grupos de trabajo sobre políticas cuánticas deben implementar cuotas o metas de género para asegurar representación significativa de mujeres. Esto puede requerir búsqueda proactiva de expertas, no solo dentro de la física cuántica, sino también en ética, derecho, ciencias sociales y otros campos relevantes para la gobernanza cuántica [9].

[21] argumentan que la democratización genuina de tecnologías cuánticas requiere múltiples formas de participación: acceso técnico, pero también participación en la definición de agendas de investigación, priorización de aplicaciones, y formulación de estándares éticos y regulatorios. Las plataformas de participación ciudadana en ciencia y tecnología pueden ser adaptadas al contexto cuántico, creando mecanismos para que mujeres y otros stakeholders diversos influyan en el desarrollo cuántico.

Las organizaciones internacionales y los foros multilaterales sobre gobernanza de tecnologías emergentes deben incorporar explícitamente consideraciones de género. [7] proponen desarrollar "diplomacia cuántica internacional" como parte de una estrategia anticipatoria para preparar la sociedad para la era cuántica. Esta diplomacia debe incluir la participación de mujeres líderes en negociaciones sobre estándares técnicos, regímenes de control de exportaciones, marcos de cooperación en investigación, y tratados sobre aplicaciones

militares de tecnologías cuánticas [23].

Un aspecto crucial es el financiamiento de investigación sobre género y tecnologías cuánticas. Actualmente, como documenta [27], hay una ausencia casi total de investigación sobre las dimensiones de género de tecnologías cuánticas. Las agencias de financiamiento deben priorizar investigación sobre: brechas de género en educación y empleo cuántico, impactos diferenciales de género de aplicaciones cuánticas específicas, perspectivas femeninas sobre prioridades para desarrollo cuántico, y mejores prácticas para promover diversidad de género en el ecosistema cuántico.

Las iniciativas de "quantum for good." "quantum for social impact." ofrecen oportunidades importantes para la participación femenina. [23] argumentan que garantizar que la computación cuántica beneficie a toda la humanidad requiere el desarrollo de soluciones para problemas globales críticos como la crisis climática, la inseguridad alimentaria y enfermedades generalizadas. Las mujeres, particularmente aquellas con experiencia en desarrollo internacional, salud pública, justicia ambiental y otros campos orientados al impacto social, pueden desempeñar roles de liderazgo en la identificación y priorización de aplicaciones cuánticas con mayor potencial de beneficio social.

[13] y [3] reportan el desarrollo de programas educativos en ética cuántica. Estos programas deben incorporar explícitamente perspectivas de género, no como un tema adicional, sino como una dimensión integral del análisis ético de tecnologías cuánticas. Los estudiantes deben ser entrenados para plantear preguntas sobre cómo las tecnologías cuánticas afectan de manera diferencial a mujeres y hombres, y cómo garantizar que el desarrollo cuántico promueva la equidad de género.

Las redes y comunidades de práctica pueden desempeñar un papel importante en el apoyo a mujeres en el ecosistema cuántico. Iniciativas como "Women in Quantum" pueden proporcionar plataformas para networking, intercambio de recursos, visibilidad de logros de mujeres en el campo, y organización colectiva para abordar barreras sistémicas. Estas redes pueden operar a nivel local, nacional e internacional, aprovechando tecnologías digitales para conectar mujeres en geografías dispersas [21].

Finalmente, es crucial reconocer que promover el liderazgo femenino en gobernanza cuántica no es responsabilidad solo de las mujeres. Los hombres en posiciones de poder y privilegio en el ecosistema cuántico deben actuar como aliados activos, utilizando su influencia para abrir puertas, amplificar voces femeninas, desafiar sesgos y discriminación, y apoyar reformas institucionales que promuevan la equidad. [5] llaman a mayor reflexividad y responsividad de todos los actores en el campo cuántico para prevenir fracasos de implementación en la interfaz ciencia-sociedad.

Las estrategias propuestas aquí no son exhaustivas, pero proporcionan un punto de partida para la acción en múltiples niveles del sistema. Implementarlas requerirá volun-

tad política, recursos financieros, y compromiso sostenido de múltiples stakeholders. Sin embargo, el costo de la inacción es demasiado alto: perpetuar la exclusión de mujeres del desarrollo y gobernanza de una de las tecnologías más transformadoras de nuestro tiempo, con consecuencias negativas tanto para la equidad como para la efectividad de la gobernanza cuántica.

7. Conclusiones

Este artículo ha examinado las oportunidades y barreras para el liderazgo femenino en la gobernanza ética de tecnologías cuánticas, empleando las teorías de agencia y stakeholders como marcos analíticos complementarios. El análisis ha revelado varias conclusiones fundamentales que tienen implicaciones tanto teóricas como prácticas para el campo emergente de la gobernanza cuántica.

Primero, la subrepresentación femenina en el ecosistema cuántico es sustancial y multifacética, extendiéndose desde la educación en ciencias cuánticas hasta la investigación, el emprendimiento y, crucialmente, las posiciones de liderazgo en organismos de gobernanza y formulación de políticas. Esta subrepresentación no es accidental, sino que refleja barreras estructurales sistémicas, incluyendo estereotipos de género sobre habilidades en STEM, culturas laborales excluyentes, falta de modelos a seguir y mentorías, y en algunos casos, discriminación directa. La documentación de estas brechas es esencial como primer paso hacia su abordaje.

Segundo, desde la perspectiva de la teoría de agencia, la exclusión femenina de la gobernanza cuántica constituye un problema de representación que genera asimetrías informativas, reduce la calidad de la supervisión sobre los agentes tecnológicos, y aumenta el riesgo de que las tecnologías cuánticas se desarrollen de maneras que no sirven los intereses de toda la sociedad. El liderazgo femenino puede funcionar como un mecanismo de control crucial, mejorando la independencia, diligencia y efectividad de la supervisión en las relaciones de agencia que caracterizan el desarrollo de tecnologías cuánticas.

Tercero, desde la perspectiva de la teoría de stakeholders, la falta de participación femenina representa una falla fundamental de legitimidad en la gobernanza cuántica. Las mujeres constituyen aproximadamente la mitad de la población global y son stakeholders significativos que serán afectados por las tecnologías cuánticas. Su exclusión de los procesos de toma de decisiones socava tanto la legitimidad de input como la legitimidad de output de los marcos de gobernanza, reduciendo la probabilidad de que estos marcos sean efectivos y ampliamente aceptados.

Cuarto, las tecnologías cuánticas plantean desafíos éticos únicos y complejos relacionados con seguridad, privacidad, impactos laborales, equidad en el acceso, sostenibilidad

ambiental, e implicaciones militares. Abordar estos desafíos requiere la participación de perspectivas diversas, incluyendo crucialmente las perspectivas femeninas. Las experiencias vividas de las mujeres, particularmente aquellas en posiciones de vulnerabilidad social, las posicionan para identificar riesgos y preocupaciones que podrían ser menos visibles para grupos más privilegiados.

Quinto, promover el liderazgo femenino en la gobernanza cuántica no es simplemente una cuestión de equidad o justicia social, aunque estos argumentos son importantes por derecho propio. Es también un imperativo estratégico para garantizar que las tecnologías cuánticas se desarrollen de manera que beneficien a toda la humanidad, no solo a una élite técnica y económica. La diversidad de género en la gobernanza mejora la calidad de la toma de decisiones, fortalece la supervisión, aumenta la legitimidad, y reduce la probabilidad de consecuencias no anticipadas y efectos adversos.

Sexto, existen estrategias concretas y viables para fomentar la participación y el liderazgo femenino en gobernanza cuántica, operando en múltiples niveles del sistema: educativo, organizacional, sectorial y de políticas públicas. Estas estrategias incluyen la democratización del acceso al conocimiento cuántico, el desarrollo de programas de mentorías y redes de apoyo, la implementación de políticas corporativas sensibles al género, el establecimiento de metas de diversidad en organismos de gobernanza, el financiamiento de investigación sobre género y tecnologías cuánticas, y la promoción de alianzas entre hombres y mujeres para transformar culturas institucionales.

Las implicaciones teóricas de este análisis se extienden más allá del caso específico de las tecnologías cuánticas. Demuestran la utilidad de integrar las teorías de agencia y stakeholders para analizar gobernanza de tecnologías emergentes, y sugieren que las consideraciones de género deben ser centrales, no periféricas, en el análisis de gobernanza tecnológica. El marco desarrollado aquí puede ser adaptado a otros contextos de tecnologías emergentes, desde inteligencia artificial hasta biotecnología y nanotecnología.

Las implicaciones prácticas son igualmente significativas. Para los formuladores de políticas, el análisis sugiere que promover la diversidad de género debe ser una prioridad explícita en el diseño de marcos de gobernanza para tecnologías cuánticas. Para las organizaciones de investigación y empresas de tecnología cuántica, sugiere que la diversidad de género no es solo una cuestión de responsabilidad social corporativa, sino un factor que influye en la calidad, legitimidad y sostenibilidad de sus operaciones. Para las organizaciones de mujeres en STEM y los movimientos feministas más amplios, sugiere que la gobernanza de tecnologías cuánticas es un terreno importante para el activismo y la advocacy.

Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones de este análisis. Primero, el enfoque en género binario, aunque necesario dada la estructura de los datos disponibles,

no captura completamente la diversidad de experiencias de género. La investigación futura debe considerar las experiencias de personas no binarias y transgénero en el ecosistema cuántico. Segundo, el análisis se ha centrado principalmente en género como categoría de análisis, pero las experiencias de las mujeres no son homogéneas: están atravesadas por raza, clase, geografía, sexualidad, discapacidad y otras dimensiones de identidad. Un análisis interseccional más sofisticado es necesario para capturar esta complejidad.

Tercero, el énfasis en el liderazgo podría ser interpretado como un enfoque individualista que no aborda suficientemente las transformaciones estructurales necesarias. Si bien el liderazgo femenino es importante, es solo un componente de lo que debe ser un proyecto más amplio de democratización de las tecnologías cuánticas y transformación de las relaciones de poder que estructuran la producción del conocimiento científico y tecnológico.

Cuarto, la mayor parte de la literatura sobre tecnologías cuánticas permanece profundamente técnica y despolitizada, con poca atención a cuestiones de poder, equidad y justicia. Como reveló [27], menos del uno por ciento de los abstracts relacionados con tecnologías cuánticas mencionan consideraciones sociales, y los frameworks de equidad, diversidad e inclusión están completamente ausentes. Esta ausencia refleja valores y prioridades específicos dentro de la comunidad cuántica que deben ser desafiados.

Mirando hacia adelante, varias direcciones para investigación futura emergen. Primero, se necesita investigación empírica sobre las experiencias de mujeres en el ecosistema cuántico: qué barreras enfrentan, qué estrategias emplean para navegar estas barreras, y qué intervenciones consideran más efectivas. Segundo, se necesitan estudios comparativos que examinen cómo diferentes países y regiones abordan cuestiones de género en la gobernanza de tecnologías cuánticas, identificando mejores prácticas y lecciones aprendidas. Tercero, se necesita investigación sobre los impactos diferenciales de género de aplicaciones cuánticas específicas, para informar decisiones sobre priorización de investigación y desarrollo.

Cuarto, se necesita trabajo teórico adicional que integre perspectivas feministas sobre ciencia y tecnología con análisis de tecnologías cuánticas. Los estudios feministas de ciencia y tecnología han desarrollado herramientas analíticas sofisticadas para entender cómo el género configura la producción de conocimiento científico y el diseño de tecnologías. Aplicar estas herramientas al contexto cuántico podría generar insights valiosos que complementen el análisis de teorías de agencia y stakeholders desarrollado aquí.

Finalmente, se necesita investigación acción participativa que involucre a mujeres en el ecosistema cuántico como co-investigadoras, no solo como sujetos de estudio. Este enfoque reconoce que las mujeres tienen expertise sobre sus propias experiencias y deben ser socias en la producción de conocimiento sobre género y tecnologías cuánticas, así como

en el diseño de intervenciones para promover la equidad.

En conclusión, las tecnologías cuánticas representan una de las fronteras más emocionantes y consecuentes de la ciencia y la tecnología contemporáneas. Cómo estas tecnologías se desarrollen y desplieguen tendrá implicaciones profundas para las sociedades humanas y el planeta en las próximas décadas. Garantizar que este desarrollo sea guiado por marcos de gobernanza efectivos, legítimos y equitativos no es solo un imperativo técnico, sino un imperativo moral y político. El liderazgo femenino en estos marcos de gobernanza no es un lujo o una opción, sino una necesidad fundamental para construir un futuro cuántico que sirva a toda la humanidad.

Referencias

- [1] Akshay Ajagekar and Fengqi You. Quantum computing and quantum artificial intelligence for renewable and sustainable energy: A emerging prospect towards climate neutrality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165:112493, September 2022.
- [2] Nivedita Arora and Prem Kumar. Sustainable quantum computing: Opportunities and challenges of benchmarking carbon in the quantum computing lifecycle. *arXiv.org*, 2024.
- [3] Joan Étude Arrow, Sara E. Marsh, and Josephine C. Meyer. A holistic approach to quantum ethics education. In *2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, pages 119–128. IEEE, 2023.
- [4] Francesco Bova, Avi Goldfarb, and Roger G. Melko. Commercial applications of quantum computing. *EPJ Quantum Technology*, 8(1), 2021.
- [5] Christopher Coenen, Alexei Grinbaum, Armin Grunwald, Colin Milburn, and Pieter Vermaas. Quantum technologies and society: Towards a different spin. *NanoEthics*, 16(1):1–6, 2022.
- [6] Cicilia Damayanti. Quantum ethics: Navigating the intersection of quantum mechanics and metaethics in the digital era for a just and equitable society. *Jurnal Filsafat*, 34(2):210, 2024.
- [7] Eline de Jong. Own the unknown: An anticipatory approach to prepare society for the quantum age. *Digital Society*, 1(2), 2022.
- [8] Kin Tung Michael Ho, Kuan-Cheng Chen, Lily Lee, Felix Burt, Shang Yu, and Po-Heng Lee. Quantum computing for climate resilience and sustainability challenges.

- In *2024 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, pages 262–267. IEEE, September 2024.
- [9] Elif Kiesow Cortez, Jane R. Yakowitz Bambauer, and Saikat Guha. A quantum policy and ethics roadmap. *SSRN Electronic Journal*, 2023.
- [10] Mauritz Kop. Quantum-elspi: A novel field of research. *Digital Society*, 2(2), 2023.
- [11] Michal Krelina. Quantum technology for military applications. *EPJ Quantum Technology*, 8(1), 2021.
- [12] Vivek Krishnamurthy. Quantum technology and human rights: an agenda for collaboration. *Quantum Science and Technology*, 7(4):044003, 2022.
- [13] Josephine C. Meyer. A holistic approach to quantum ethics education, 2023.
- [14] Thomas Morstyn and Xiangyue Wang. Opportunities for quantum computing within net-zero power system optimization. *Joule*, 8(6):1619–1640, 2024.
- [15] Laurentiu Nita, Laura Mazzoli Smith, Nicholas Chancellor, and Helen Cramman. The challenge and opportunities of quantum literacy for future education and transdisciplinary problem-solving. *Research in Science & Technological Education*, 41(2):564–580, May 2021.
- [16] Hari P. Paudel, Madhava Syamlal, Scott E. Crawford, Yueh-Lin Lee, Roman A. Shugayev, Ping Lu, Paul R. Ohodnicki, Darren Mollot, and Yuhua Duan. Quantum computing and simulations for energy applications: Review and perspective. *ACS Engineering Au*, 2(3):151–196, 2022.
- [17] G. Peterssen. Quantum technology impact: The necessary workforce for developing quantum software, 2020.
- [18] Luca M. Possati. Quantum technologies: a hermeneutic technology assessment approach. *NanoEthics*, 18(1), 2024.
- [19] Priyanka, Piyush Dhuliya, Deepak Singh Rana, Sweta Goyal, Sanjeev Kukreti, and Sarthak Pundir. Quantum computing for sustainable development: A framework for environmental and social impact. In *2024 International Conference on Advances in Computing, Communication and Materials (ICACCM)*, pages 1–7. IEEE, November 2024.
- [20] A. Saltan and Sami Hyrynsalmi. The business perspective of quantum computing: An overview. In *ICSOB Companion*, 2022.

- [21] Zeki C Seskir, Steven Umbrello, Christopher Coenen, and Pieter E Vermaas. Democratization of quantum technologies. *Quantum Science and Technology*, 8(2):024005, 2023.
- [22] Mitsuharu Takeori, Noriaki Shimada, Dimitris Alevras, Bob Parney, Deepak Sharma, Qi Chu, and Bernard Cena. Workforce task execution scheduling using gate-based quantum computers. In *2024 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, pages 315–321. IEEE, 2024.
- [23] Matthias Troyer, Emily Violi Benjamin, and Ani Gevorkian. Quantum for good and the societal impact of quantum computing, 2024.
- [24] Pieter E. Vermaas. The societal impact of the emerging quantum technologies: a renewed urgency to make quantum theory understandable. *Ethics and Information Technology*, 19(4):241–246, 2017.
- [25] Yazhen Wang and Xinyu Song. Quantum science and quantum technology. *Statistical Science*, 35(1), 2020.
- [26] Wheatley Research Consultancy. Quantum shifts: The societal implications of quantum computing on security, privacy, and the economy, 2024.
- [27] Gregor Wolbring. Auditing the 'social' of quantum technologies: A scoping review. *Societies*, 12(2):41, 2022.
- [28] Jorge Yago Malo, Luca Lepori, Laura Gentini, and Maria Luisa Chiofalo. Atomic quantum technologies for quantum matter and fundamental physics applications. *Technologies*, 12(5):64, 2024.
- [29] Sarah Young, Catherine Brooks, and Jason Pridmore. Societal implications of quantum technologies through a technocriticism of quantum key distribution. *First Monday*, 2024.