

Acerca el rol de los recursos en la ingeniería del software cuántico

FEDERICO HOLIK

TLISC 2024 [RIPAISC](#)

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR, BAHÍA BLANCA, ARGENTINA



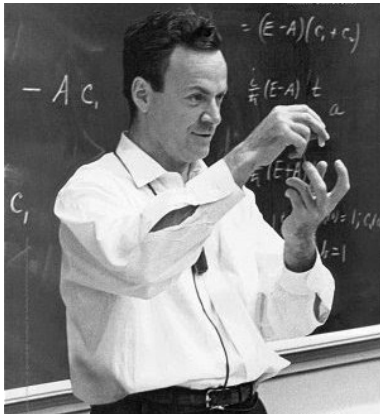
- 1 Quantumness
- 2 Ventaja cuántica en la era NISQ
- 3 No-localidad y entrelazamiento

- 1 Quantumness
- 2 Ventaja cuántica en la era NISQ
- 3 No-localidad y entrelazamiento

¿Cuán cuántico es un estado cuántico?

Feynman:

“Nature isn’t classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you’d better make it quantum mechanical, and by golly it’s a wonderful problem, because it doesn’t look so easy.” R. P. Feynman, *Simulating Physics With Computers* (1981)



¿Cuán cuántico es un estado cuántico?

Características que se **apartan** del **comportamiento** clásico.

Característica

- No-localidad
- Entrelazamiento
- Contextualidad
- Magia Cuántica
- Aleatoriedad verdadera, indistibilidad, etc...
- ¿Por qué hay ventaja cuántica?



¿Cuán cuántico es un estado cuántico?

Características que se **apartan** del **comportamiento** clásico.

Característica

- No-localidad
- Entrelazamiento
- Contextualidad
- Magia Cuántica
- Aleatoriedad verdadera, indistibilidad, etc...
- ¿Por qué hay ventaja cuántica?

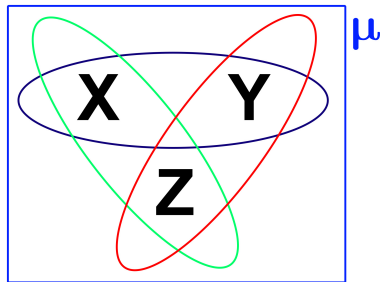
$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle)$$

¿Cuán cuántico es un estado cuántico?

Características que se **apartan** del **comportamiento** clásico.

Característica

- No-localidad
- Entrelazamiento
- Contextualidad
- Magia Cuántica
- Aleatoriedad verdadera, indistibilidad, etc...
- ¿Por qué hay ventaja cuántica?



¿Cuán cuántico es un estado cuántico?

Características que se **apartan** del **comportamiento** clásico.

Característica

- No-localidad
- Entrelazamiento
- Contextualidad
- Magia Cuántica
- Aleatoriedad verdadera, indistibilidad, etc...
- ¿Por qué hay ventaja cuántica?

Clifford + T

¿Cuán cuántico es un estado cuántico?

Características que se **apartan** del **comportamiento** clásico.

Característica

- No-localidad
- Entrelazamiento
- Contextualidad
- Magia Cuántica
- Aleatoriedad verdadera, indistinguibilidad, etc...
- ¿Por qué hay ventaja cuántica?

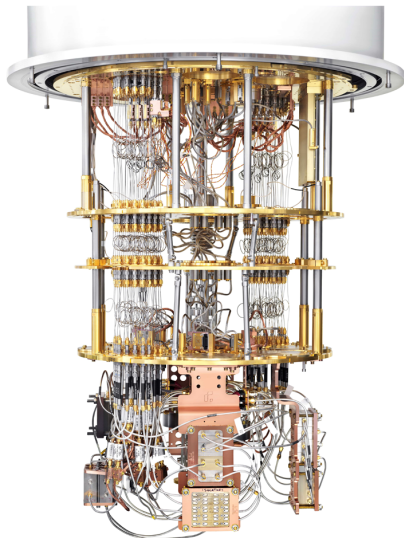


¿Cuán cuántico es un estado cuántico?

Características que se **apartan** del **comportamiento clásico**.

Característica

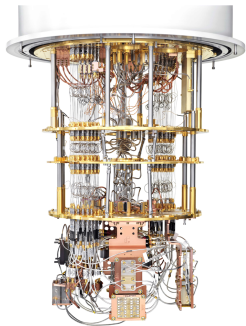
- No-localidad
- Entrelazamiento
- Contextualidad
- Magia Cuántica
- Aleatoriedad verdadera, indistibilidad, etc...
- ¿Por qué hay ventaja cuántica?



¿Cuán cuántico es un estado cuántico?

Tesis de Church-Turing extendida (ECTT)

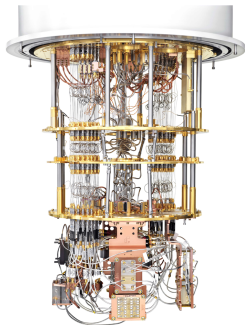
- “Todos los problemas computacionales que se pueden resolver de forma eficiente con dispositivos físicos (realistas), pueden también resolverse de forma eficiente por una máquina de Turing probabilística”.
(S. Aaronson and A. Arkhipov, arXiv:1011.3245v1, 2010).
- La evidencia teórica y experimental sugiere que la ECTT es falsa.



¿Cuán cuántico es un estado cuántico?

Tesis de Church-Turing extendida (ECTT)

- “Todos los problemas computacionales que se pueden resolver de forma eficiente con dispositivos físicos (realistas), pueden también resolverse de forma eficiente por una máquina de Turing probabilística”.
(S. Aaronson and A. Arkhipov, arXiv:1011.3245v1, 2010).
- La evidencia teórica y experimental sugiere que la ECTT es falsa.



¿Cómo *cuantificar* cuán cuántico es un estado cuántico?

Distintas metodologías

- Medidas de entrelazamiento/contextualidad
- Desigualdades de no-localidad/no-contextualidad
- Magia Cuántica

¿Cómo *cuantificar* cuán cuántico es un estado cuántico?

Distintas metodologías

- Medidas de entrelazamiento/contextualidad
- Desigualdades de no-localidad/no-contextualidad
- Magia Cuántica

¿Cómo *cuantificar* cuán cuántico es un estado cuántico?

Distintas metodologías

- Medidas de entrelazamiento/contextualidad
- Desigualdades de no-localidad/no-contextualidad
- Magia Cuántica

¿Cómo *generar* y *proteger* propiedades cuánticas?

Preguntas clave:

- ¿Cómo **generar** propiedades cuánticas?
- ¿Cómo **protegerlas**?

¿Cómo *generar* y *proteger* propiedades cuánticas?

Preguntas clave:

- ¿Cómo **generar** propiedades cuánticas?
- ¿Cómo **protegerlas**?

Contenido

- Estudiamos el espacio de estados cuánticos usando matrices unatarias aleatorias (de acuerdo a la medida de Haar).
- Estudiamos cómo se distribuyen los recursos en el espacio de estados cuánticos.
- Presentamos una discusión acerca de la ventaja cuántica y los desafíos de la ingeniería del software en la era NISQ.

Contenido

- Estudiamos el espacio de estados cuánticos usando matrices unatarias aleatorias (de acuerdo a la medida de Haar).
- Estudiamos cómo se distribuyen los recursos en el espacio de estados cuánticos.
- Presentamos una discusión acerca de la ventaja cuántica y los desafíos de la ingeniería del software en la era NISQ.

Contenido

- Estudiamos el espacio de estados cuánticos usando matrices unatarias aleatorias (de acuerdo a la medida de Haar).
- Estudiamos cómo se distribuyen los recursos en el espacio de estados cuánticos.
- Presentamos una discusión acerca de la ventaja cuántica y los desafíos de la ingeniería del software en la era NISQ.

- 1 Quantumness
- 2 Ventaja cuántica en la era NISQ
- 3 No-localidad y entrelazamiento

Diferentes etapas: Computación Cuántica Universal Resistente a Errores

- **Concepto:** era de la computación cuántica universal tolerante a errores.
- Algoritmo de Shor, simulación de problemas de muchos cuerpos cuánticos a gran escala, aplicaciones a la química, desarrollo de drogas, diseño de materiales, etc.
- Todavía no estamos en esta etapa.
- Y no vamos a estar ahí por bastante tiempo (10+ años). Probablemente, nunca ocurra.
- Gran parte de las investigaciones se enfocan en el futuro de prosperidad. Esto ayuda a planificar la industria y la investigación.

Diferentes etapas: Computación Cuántica Universal Resistente a Errores

- Concepto: era de la computación cuántica universal tolerante a errores.
- Algoritmo de Shor, simulación de problemas de muchos cuerpos cuánticos a gran escala, aplicaciones a la química, desarrollo de drogas, diseño de materiales, etc.
- Todavía no estamos en esta etapa.
- Y no vamos a estar ahí por bastante tiempo (10+ años). Probablemente, nunca ocurra.
- Gran parte de las investigaciones se enfocan en el futuro de prosperidad. Esto ayuda a planificar la industria y la investigación.

Diferentes etapas: Computación Cuántica Universal Resistente a Errores

- Concepto: era de la computación cuántica universal tolerante a errores.
- Algoritmo de Shor, simulación de problemas de muchos cuerpos cuánticos a gran escala, aplicaciones a la química, desarrollo de drogas, diseño de materiales, etc.
- Todavía no estamos en esta etapa.
- Y no vamos a estar ahí por bastante tiempo (10+ años). Probablemente, nunca ocurra.
- Gran parte de las investigaciones se enfocan en el futuro de prosperidad. Esto ayuda a planificar la industria y la investigación.

Diferentes etapas: Computación Cuántica Universal Resistente a Errores

- Concepto: era de la computación cuántica universal tolerante a errores.
- Algoritmo de Shor, simulación de problemas de muchos cuerpos cuánticos a gran escala, aplicaciones a la química, desarrollo de drogas, diseño de materiales, etc.
- Todavía no estamos en esta etapa.
- Y no vamos a estar ahí por bastante tiempo (10+ años). Probablemente, nunca ocurra.
- Gran parte de las investigaciones se enfocan en el futuro de prosperidad. Esto ayuda a planificar la industria y la investigación.

Diferentes etapas: Computación Cuántica Universal Resistente a Errores

- Concepto: era de la computación cuántica universal tolerante a errores.
- Algoritmo de Shor, simulación de problemas de muchos cuerpos cuánticos a gran escala, aplicaciones a la química, desarrollo de drogas, diseño de materiales, etc.
- Todavía no estamos en esta etapa.
- Y no vamos a estar ahí por bastante tiempo (10+ años). Probablemente, nunca ocurra.
- Gran parte de las investigaciones se enfocan en el futuro de prosperidad. Esto ayuda a planificar la industria y la investigación.

- Era NISQ: **Noisy Intermediate Scale Quantum**
- Computadoras cuánticas ruidosas desde decenas a centenares de qubits. No ay protocolo de corrección de errores.
- Disponibles actualmente en el mercado.
- El uso está vinculado a la investigación: investigación básica y la búsqueda de aplicaciones para la industria (esto incluye el corto y mediano plazo, así como la puesta a punto para el futuro).
- La búsqueda de la demostración de la ventaja cuántica. Varios dispositivos one-way.
- Importante mencionar: el desaffo de combinar HPC y procesadores cuánticos para implementar modelos de computación híbridos.

- Era NISQ: **N**oisy **I**ntermediate **S**cale **Q**uantum
- Computadoras cuánticas ruidosas desde decenas a centenares de qubits. No ay protocolo de corrección de errores.
- Disponibles actualmente en el mercado.
- El uso está vinculado a la investigación: investigación básica y la búsqueda de aplicaciones para la industria (esto incluye el corto y mediano plazo, así como la puesta a punto para el futuro).
- La búsqueda de la demostración de la ventaja cuántica. Varios dispositivos one-way.
- Importante mencionar: el desaffo de combinar HPC y procesadores cuánticos para implementar modelos de computación híbridos.

- Era NISQ: **N**oisy **I**ntermediate **S**cale **Q**uantum
- Computadoras cuánticas ruidosas desde decenas a centenares de qubits. No ay protocolo de corrección de errores.
- Disponibles actualmente en el mercado.
- El uso está vinculado a la investigación: investigación básica y la búsqueda de aplicaciones para la industria (esto incluye el corto y mediano plazo, así como la puesta a punto para el futuro).
- La búsqueda de la demostración de la ventaja cuántica. Varios dispositivos one-way.
- Importante mencionar: el desaffo de combinar HPC y procesadores cuánticos para implementar modelos de computación híbridos.

- Era NISQ: **N**oisy **I**ntermediate **S**cale **Q**uantum
- Computadoras cuánticas ruidosas desde decenas a centenares de qubits. No ay protocolo de corrección de errores.
- Disponibles actualmente en el mercado.
- El uso está vinculado a la investigación: investigación básica y la búsqueda de aplicaciones para la industria (esto incluye el corto y mediano plazo, así como la puesta a punto para el futuro).
- La búsqueda de la demostración de la ventaja cuántica. Varios dispositivos one-way.
- Importante mencionar: el desafío de combinar HPC y procesadores cuánticos para implementar modelos de computación híbridos.

- Era NISQ: **N**oisy **I**ntermediate **S**cale **Q**uantum
- Computadoras cuánticas ruidosas desde decenas a centenares de qubits. No ay protocolo de corrección de errores.
- Disponibles actualmente en el mercado.
- El uso está vinculado a la investigación: investigación básica y la búsqueda de aplicaciones para la industria (esto incluye el corto y mediano plazo, así como la puesta a punto para el futuro).
- La búsqueda de la demostración de la ventaja cuántica. Varios dispositivos one-way.
- Importante mencionar: el desafío de combinar HPC y procesadores cuánticos para implementar modelos de computación híbridos.

- Era NISQ: **N**oisy **I**ntermediate **S**cale **Q**uantum
- Computadoras cuánticas ruidosas desde decenas a centenares de qubits. No ay protocolo de corrección de errores.
- Disponibles actualmente en el mercado.
- El uso está vinculado a la investigación: investigación básica y la búsqueda de aplicaciones para la industria (esto incluye el corto y mediano plazo, así como la puesta a punto para el futuro).
- La búsqueda de la demostración de la ventaja cuántica. Varios dispositivos one-way.
- Importante mencionar: el desafío de combinar HPC y procesadores cuánticos para implementar modelos de computación híbridos.

¿Qué pasa con el software en la era NISQ?

- Todos los ejemplos de uso que dimos requieren del desarrollo de software específico a correr tanto en computadoras clásicas, como cuánticas.
- Esta demanda induce una industria que involucra a empresas de todos los tamaños, así como agencias gubernamentales e iniciativas nacionales.
- Los dispositivos actuales son defectuosos. ¿Cuáles son las consecuencias para la ingeniería del software cuántico?
- La ingeniería del software cuántico enfrenta desafíos específicos en la era NISQ (que son diferentes a los de la computación cuántica universal tolerante a errores).
- Los dispositivos actuales producen los recursos requeridos de forma defectuosa: ¿Cómo incluir este problema en el desarrollo de software? ¿Cómo lidiar con las distintas arquitecturas y performances?

¿Qué pasa con el software en la era NISQ?

- Todos los ejemplos de uso que dimos requieren del desarrollo de software específico a correr tanto en computadoras clásicas, como cuánticas.
- Esta demanda induce una industria que involucra a empresas de todos los tamaños, así como agencias gubernamentales e iniciativas nacionales.
- Los dispositivos actuales son defectuosos. ¿Cuáles son las consecuencias para la ingeniería del software cuántico?
- La ingeniería del software cuántico enfrenta desafíos específicos en la era NISQ (que son diferentes a los de la computación cuántica universal tolerante a errores).
- Los dispositivos actuales producen los recursos requeridos de forma defectuosa: ¿Cómo incluir este problema en el desarrollo de software? ¿Cómo lidiar con las distintas arquitecturas y performances?

¿Qué pasa con el software en la era NISQ?

- Todos los ejemplos de uso que dimos requieren del desarrollo de software específico a correr tanto en computadoras clásicas, como cuánticas.
- Esta demanda induce una industria que involucra a empresas de todos los tamaños, así como agencias gubernamentales e iniciativas nacionales.
- Los dispositivos actuales son defectuosos. ¿Cuáles son las consecuencias para la ingeniería del software cuántico?
- La ingeniería del software cuántico enfrenta desafíos específicos en la era NISQ (que son diferentes a los de la computación cuántica universal tolerante a errores).
- Los dispositivos actuales producen los recursos requeridos de forma defectuosa: ¿Cómo incluir este problema en el desarrollo de software? ¿Cómo lidiar con las distintas arquitecturas y performances?

¿Qué pasa con el software en la era NISQ?

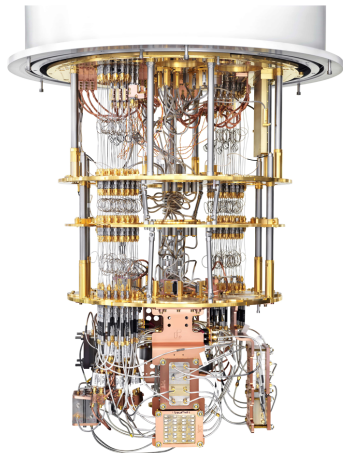
- Todos los ejemplos de uso que dimos requieren del desarrollo de software específico a correr tanto en computadoras clásicas, como cuánticas.
- Esta demanda induce una industria que involucra a empresas de todos los tamaños, así como agencias gubernamentales e iniciativas nacionales.
- Los dispositivos actuales son defectuosos. ¿Cuáles son las consecuencias para la ingeniería del software cuántico?
- La ingeniería del software cuántico enfrenta desafíos específicos en la era NISQ (que son diferentes a los de la computación cuántica universal tolerante a errores).
- Los dispositivos actuales producen los recursos requeridos de forma defectuosa: ¿Cómo incluir este problema en el desarrollo de software? ¿Cómo lidiar con las distintas arquitecturas y performances?

¿Qué pasa con el software en la era NISQ?

- Todos los ejemplos de uso que dimos requieren del desarrollo de software específico a correr tanto en computadoras clásicas, como cuánticas.
- Esta demanda induce una industria que involucra a empresas de todos los tamaños, así como agencias gubernamentales e iniciativas nacionales.
- Los dispositivos actuales son defectuosos. ¿Cuáles son las consecuencias para la ingeniería del software cuántico?
- La ingeniería del software cuántico enfrenta desafíos específicos en la era NISQ (que son diferentes a los de la computación cuántica universal tolerante a errores).
- Los dispositivos actuales producen los recursos requeridos de forma defectuosa: ¿Cómo incluir este problema en el desarrollo de software? ¿Cómo lidiar con las distintas arquitecturas y performances?

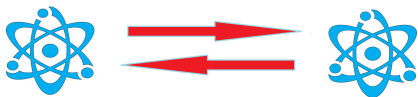
¿Por qué hay ventaja cuántica?

- 1 Las razones no se conocen completamente.
- 2 Podría decirse que la causa es la no-localidad (mecánica Bohmiana).
- 3 Un Everettiano podría argumentar que las superposiciones dan lugar a una computación en “paralelo” entre diferentes mundos (muchos mundos).
- 4 Dinámica cuántica de muchos mundos: “computación en paralelo”.



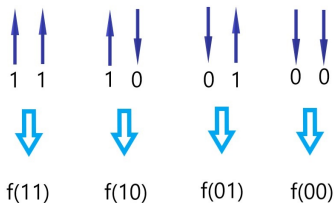
¿Por qué hay ventaja cuántica?

- 1 Las razones no se conocen completamente.
- 2 Podría decirse que la causa es la no-localidad (mecánica Bohmiana).**
- 3 Un Everettiano podría argumentar que las superposiciones dan lugar a una computación en “paralelo” entre diferentes mundos (muchos mundos).
- 4 Dinámica cuántica de muchos mundos: “computación en paralelo”.



¿Por qué hay ventaja cuántica?


- 1 Las razones no se conocen completamente.
- 2 Podría decirse que la causa es la no-localidad (mecánica Bohmiana).
- 3 Un Everettiano podría argumentar que las superposiciones dan lugar a una computación en “paralelo” entre diferentes mundos (muchos mundos).**
- 4 Dinámica cuántica de muchos mundos: “computación en paralelo”.



¿Por qué hay ventaja cuántica?

- 1 Las razones no se conocen completamente.
- 2 Podría decirse que la causa es la no-localidad (mecánica Bohmiana).
- 3 Un Everettiano podría argumentar que las superposiciones dan lugar a una computación en “paralelo” entre diferentes mundos (muchos mundos).
- 4 Dinámica cuántica de muchos mundos: “computación en paralelo”.

$$\begin{array}{ccccccc} \uparrow & \uparrow & + & \uparrow & \downarrow & + & \downarrow & \uparrow & + & \downarrow & \downarrow \\ 1 & 1 & & 1 & 0 & & 0 & 1 & & 0 & 0 \end{array}$$



$$f(11) + f(10) + f(01) + f(00)$$

Un dispositivo que sólo puede::

- Preparar a los qubits en la base computacional.
- Aplicar compuertas de Clifford (Hadamard, controlled-NOT y S) y
- Realizar mediciones en la base computacional.

... es simulable clásicamente de forma eficiente.

Este circuito puede generar estados maximalmente superpuestos y entrelazados.

Teorema de Gottesman-Knill \implies No puede ser sólo el entrelazamiento o la superposición.

Un dispositivo que sólo puede::

- Preparar a los qubits en la base computacional.
- Aplicar compuertas de Clifford (Hadamard, controlled-NOT y S)
y
- Realizar mediciones en la base computacional.

... es simulable clásicamente de forma eficiente.

Este circuito puede generar estados maximalmente superpuestos y entrelazados.

Teorema de Gottesman-Knill \implies No puede ser sólo el entrelazamiento o la superposición.

Un dispositivo que sólo puede::

- Preparar a los qubits en la base computacional.
- Aplicar compuertas de Clifford (Hadamard, controlled-NOT y S) y
- Realizar mediciones en la base computacional.

... es simulable clásicamente de forma eficiente.

Este circuito puede generar estados maximalmente superpuestos y entrelazados.

Teorema de Gottesman-Knill \implies No puede ser sólo el entrelazamiento o la superposición.

Un dispositivo que sólo puede::

- Preparar a los qubits en la base computacional.
- Aplicar compuertas de Clifford (Hadamard, controlled-NOT y S)
y
- Realizar mediciones en la base computacional.

... **es simulable clásicamente de forma eficiente.**

Este circuito puede generar estados maximalmente
superpuestos y entrelazados.

Teorema de Gottesman-Knill \implies No puede ser sólo el
entrelazamiento o la superposición.

Un dispositivo que sólo puede::

- Preparar a los qubits en la base computacional.
- Aplicar compuertas de Clifford (Hadamard, controlled-NOT y S) y
- Realizar mediciones en la base computacional.

... **es simulable clásicamente de forma eficiente.**

Este circuito puede generar estados maximalmente **superpuestos** y **entrelazados**.

Teorema de Gottesman-Knill \implies No puede ser sólo el entrelazamiento o la superposición.

Un dispositivo que sólo puede::

- Preparar a los qubits en la base computacional.
- Aplicar compuertas de Clifford (Hadamard, controlled-NOT y S)
y
- Realizar mediciones en la base computacional.

... **es simulable clásicamente de forma eficiente.**

Este circuito puede generar estados maximalmente **superpuestos** y **entrelazados**.

Teorema de Gottesman-Knill \implies No puede ser sólo el entrelazamiento o la superposición.

Espacio de estados cuánticos

- La dimensión del espacio de estados cuánticos crece como 2^n : difícil de simular.
- También, uno podría preguntarse: ¿Cuál es el peso relativo de las distintas propiedades cuánticas?
- ¿Dónde están? ¿Cómo se distribuyen en el espacio de estados cuánticos?
- Ventaja cuántica: parece que el tamaño no es lo único que importa. *Las propiedades cuánticas son relevantes.*
- Certificación: ¿Hasta qué punto un dispositivo cuántico dado es capaz de generar todos los estados cuánticos posibles? ¿Cuántos son necesarios para obtener una “ventaja tecnológica”?
- **Diferencia crítica:** Notar que las propiedades del hardware clásico son conocidas: desde el punto de vista físico, no ocurre nada esencialmente diferente cuando aumenta el número de transistores.
- **Caso cuántico:** Todavía estamos explorando las características de los sistemas cuánticos de múltiples qubits.

Espacio de estados cuánticos

- La dimensión del espacio de estados cuánticos crece como 2^n : difícil de simular.
- También, uno podría preguntarse: ¿Cuál es el peso relativo de las distintas propiedades cuánticas?
- ¿Dónde están? ¿Cómo se distribuyen en el espacio de estados cuánticos?
- Ventaja cuántica: parece que el tamaño no es lo único que importa. *Las propiedades cuánticas son relevantes.*
- Certificación: ¿Hasta qué punto un dispositivo cuántico dado es capaz de generar todos los estados cuánticos posibles? ¿Cuántos son necesarios para obtener una “ventaja tecnológica”?
- **Diferencia crítica:** Notar que las propiedades del hardware clásico son conocidas: desde el punto de vista físico, no ocurre nada esencialmente diferente cuando aumenta el número de transistores.
- **Caso cuántico:** Todavía estamos explorando las características de los sistemas cuánticos de múltiples qubits.

Espacio de estados cuánticos

- La dimensión del espacio de estados cuánticos crece como 2^n : difícil de simular.
- También, uno podría preguntarse: ¿Cuál es el peso relativo de las distintas propiedades cuánticas?
- ¿Dónde están? ¿Cómo se distribuyen en el espacio de estados cuánticos?
- Ventaja cuántica: parece que el tamaño no es lo único que importa. *Las propiedades cuánticas son relevantes.*
- Certificación: ¿Hasta qué punto un dispositivo cuántico dado es capaz de generar todos los estados cuánticos posibles? ¿Cuántos son necesarios para obtener una “ventaja tecnológica”?
- **Diferencia crítica:** Notar que las propiedades del hardware clásico son conocidas: desde el punto de vista físico, no ocurre nada esencialmente diferente cuando aumenta el número de transistores.
- **Caso cuántico:** Todavía estamos explorando las características de los sistemas cuánticos de múltiples qubits.

Espacio de estados cuánticos

- La dimensión del espacio de estados cuánticos crece como 2^n : difícil de simular.
- También, uno podría preguntarse: ¿Cuál es el peso relativo de las distintas propiedades cuánticas?
- ¿Dónde están? ¿Cómo se distribuyen en el espacio de estados cuánticos?
- Ventaja cuántica: parece que el tamaño no es lo único que importa. *Las propiedades cuánticas son relevantes.*
- Certificación: ¿Hasta qué punto un dispositivo cuántico dado es capaz de generar todos los estados cuánticos posibles? ¿Cuántos son necesarios para obtener una “ventaja tecnológica”?
- **Diferencia crítica:** Notar que las propiedades del hardware clásico son conocidas: desde el punto de vista físico, no ocurre nada esencialmente diferente cuando aumenta el número de transistores.
- **Caso cuántico:** Todavía estamos explorando las características de los sistemas cuánticos de múltiples qubits.

Espacio de estados cuánticos

- La dimensión del espacio de estados cuánticos crece como 2^n : difícil de simular.
- También, uno podría preguntarse: ¿Cuál es el peso relativo de las distintas propiedades cuánticas?
- ¿Dónde están? ¿Cómo se distribuyen en el espacio de estados cuánticos?
- Ventaja cuántica: parece que el tamaño no es lo único que importa. *Las propiedades cuánticas son relevantes.*
- Certificación: ¿Hasta qué punto un dispositivo cuántico dado es capaz de generar todos los estados cuánticos posibles? ¿Cuántos son necesarios para obtener una “ventaja tecnológica”?
- **Diferencia crítica:** Notar que las propiedades del hardware clásico son conocidas: desde el punto de vista físico, no ocurre nada esencialmente diferente cuando aumenta el número de transistores.
- **Caso cuántico:** Todavía estamos explorando las características de los sistemas cuánticos de múltiples qubits.

Espacio de estados cuánticos

- La dimensión del espacio de estados cuánticos crece como 2^n : difícil de simular.
- También, uno podría preguntarse: ¿Cuál es el peso relativo de las distintas propiedades cuánticas?
- ¿Dónde están? ¿Cómo se distribuyen en el espacio de estados cuánticos?
- Ventaja cuántica: parece que el tamaño no es lo único que importa. *Las propiedades cuánticas son relevantes.*
- Certificación: ¿Hasta qué punto un dispositivo cuántico dado es capaz de generar todos los estados cuánticos posibles? ¿Cuántos son necesarios para obtener una “ventaja tecnológica”?
- **Diferencia crítica:** Notar que las propiedades del hardware clásico son conocidas: desde el punto de vista físico, no ocurre nada esencialmente diferente cuando aumenta el número de transistores.
- **Caso cuántico:** Todavía estamos explorando las características de los sistemas cuánticos de múltiples qubits.

Espacio de estados cuánticos

- La dimensión del espacio de estados cuánticos crece como 2^n : difícil de simular.
- También, uno podría preguntarse: ¿Cuál es el peso relativo de las distintas propiedades cuánticas?
- ¿Dónde están? ¿Cómo se distribuyen en el espacio de estados cuánticos?
- Ventaja cuántica: parece que el tamaño no es lo único que importa. *Las propiedades cuánticas son relevantes.*
- Certificación: ¿Hasta qué punto un dispositivo cuántico dado es capaz de generar todos los estados cuánticos posibles? ¿Cuántos son necesarios para obtener una “ventaja tecnológica”?
- **Diferencia crítica:** Notar que las propiedades del hardware clásico son conocidas: desde el punto de vista físico, no ocurre nada esencialmente diferente cuando aumenta el número de transistores.
- **Caso cuántico:** Todavía estamos explorando las características de los sistemas cuánticos de múltiples qubits.

Matrices unitarias al azar (medida de Haar)



Figure: Explorando el espacio de estados cuánticos.

Matrices unitarias al azar (medida de Haar)

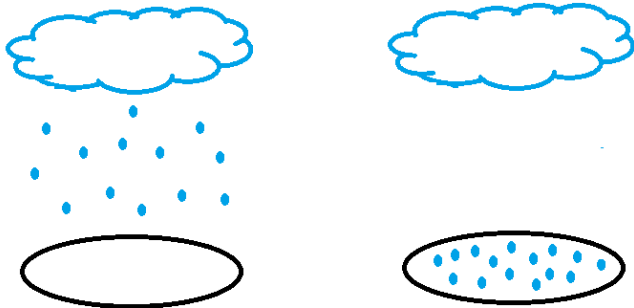


Figure: Explorando el espacio de estados cuánticos.

Matrices unitarias al azar (medida de Haar)



Figure: Explorando el espacio de estados cuánticos.

Circuitos cuánticos aleatorios

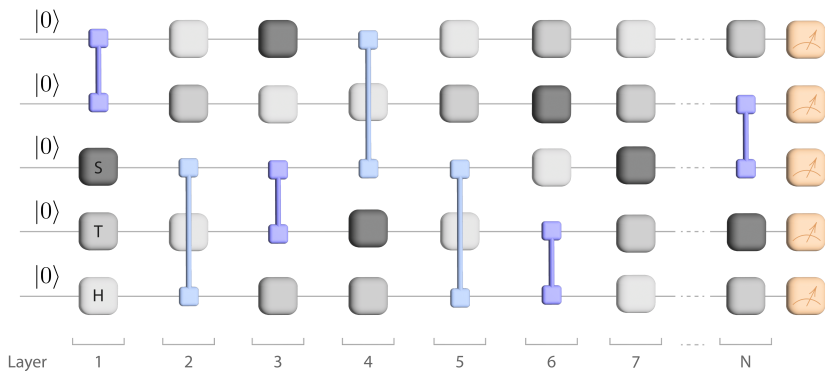


Figure: Esquema ara generar circuitos cuánticos aleatorios.

Clifford + T (depth = 200)

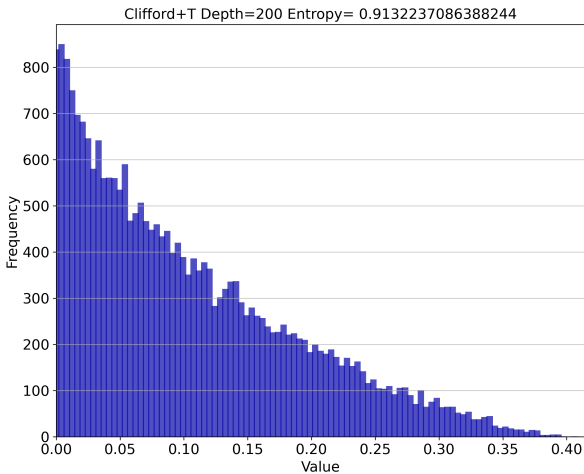


Figure: Histograma de contextualidad para Clifford + T.

Matrices unitarias al azar (medida de Haar)

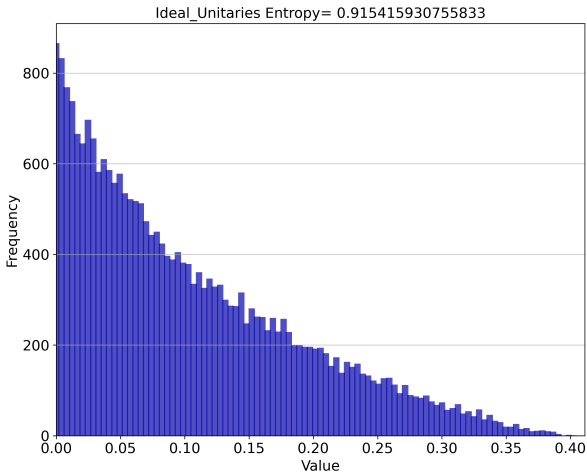
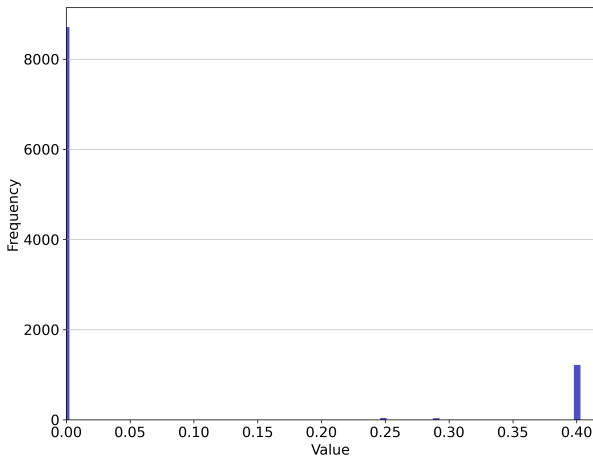


Figure: Matrices unitarias aleatorias siguiendo la medida de Haar.

Conjunto **no**-universal: Clifford (profundidad = 200) usando Qiskit



Los conjuntos universales cubren todos los valores posibles

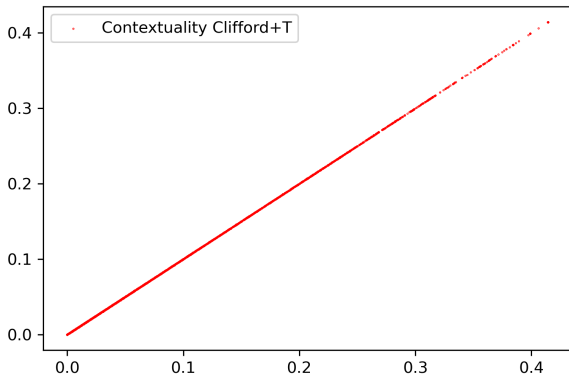


Figure: A medida que crece la profundidad, se cubren todos los posibles valores.

Los conjuntos universales cubren todos los valores posibles

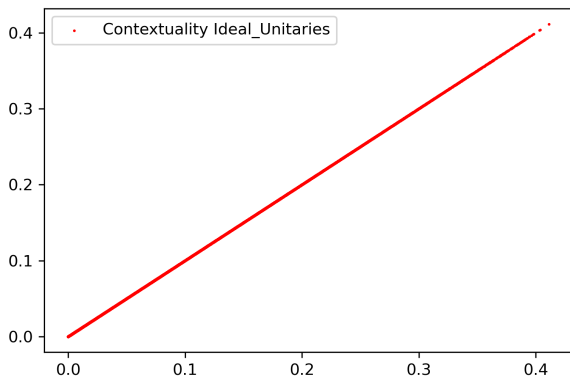


Figure: Las unitarias random también cubren todos los posibles valores.

Los valores generados con conjuntos no universales tienen huecos

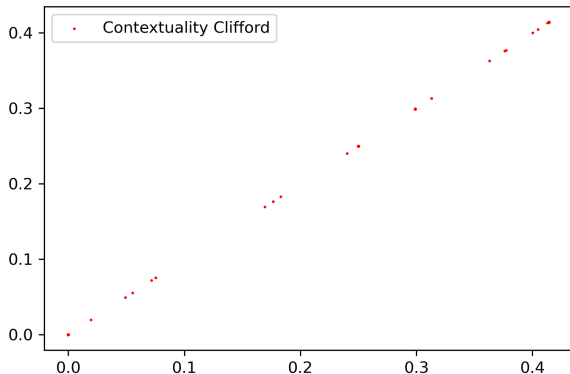


Figure: Con compuertas de Clifford no es posible alcanzar todos los valores.

- 1 Quantumness
- 2 Ventaja cuántica en la era NISQ
- 3 No-localidad y entrelazamiento

¿Qué ocurre con el entrelazamiento y la no-localidad?

Desigualdades de Svetlichny:

$$|E(ABC) + E(ABC') + E(AB'C) + E(A'BC) \quad (1)$$

$$-E(A'B'C') - E(A'B'C) - E(A'BC') - E(AB'C')| \leq 4 \quad (2)$$

Significado: si un estado viola la desigualdad, tiene no-localidad tripartita genuina.

$$|\psi_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle)|0\rangle$$

$$|GHZ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle + |111\rangle)$$

¿Qué ocurre con el entrelazamiento y la no-localidad?

Desigualdad de Svetlichny:

$$|E(ABC) + E(ABC') + E(AB'C) + E(A'BC) \quad (3)$$

$$-E(A'B'C') - E(A'B'C) - E(A'BC') - E(AB'C')| \leq 4 \quad (4)$$

Significado: si un estado viola la desigualdad, tiene no-localidad tripartita genuina.

Equipo de investigación en la Universidad de Cagliari: [Andrés Camilo Granda Arango](#), [Roberto Giuntini](#), y [Giuseppe Sergioli](#).

A. C. Granda Arango, F. H. Holik, G. Sergioli, R. Giuntini, “Geometrical Aspects Of Resources Distribution In Quantum Random Circuits”, arXiv:2405.01650v1 [quant-ph] (2024)

Histogramas de violación para la desigualdad de Svetlichny

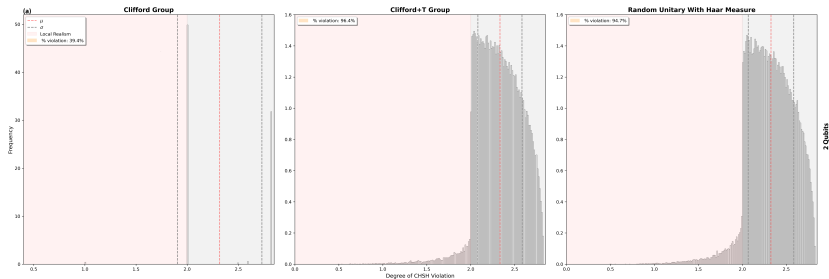


Figure: Clifford, Clifford + T y unitarias con la distribución de Haar.

Histogramas de violación para la desigualdad de Svetlichny

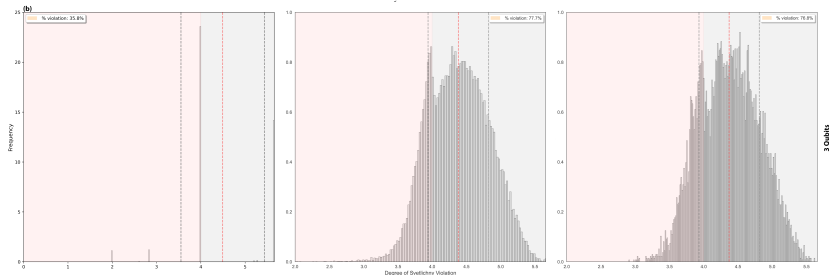


Figure: Clifford, Clifford + T y unitarias con la distribución de Haar.

Histogramas de violación para la desigualdad de Svetlichny

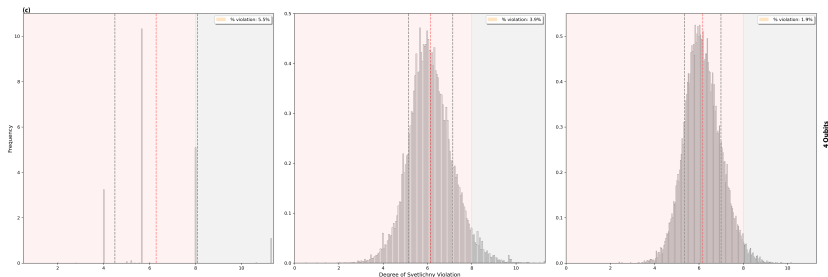


Figure: Clifford, Clifford + T y unitarias con la distribución de Haar.

Histogramas de violación para la desigualdad de Svetlichny

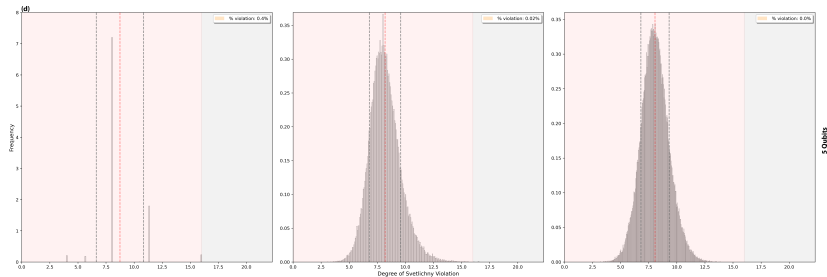


Figure: Clifford, Clifford + T y unitarias con la distribución de Haar.

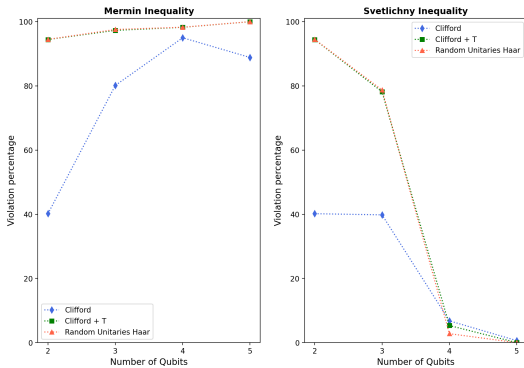


Figure: Fracción de violación.

Volumen del conjunto de estados con no-localidad multipartita genuina

- ¿Cuál es el **volúmen** (relativo) del conjunto de estados con no-localidad multipartita genuina a medida que crece n ?
- **Conjetura:** tiende a cero.
- **Observación:** el hecho de que un estado no viole la desigualdad de Svetlichny, no implica necesariamente que no exista otra desigualdad de no-localidad que sí sea violada.
- La respuesta no es obvia.

Volumen del conjunto de estados con no-localidad multipartita genuina

- ¿Cuál es el **volúmen** (relativo) del conjunto de estados con no-localidad multipartita genuina a medida que crece n ?
- **Conjetura**: tiende a cero.
- Observación: el hecho de que un estado no viole la desigualdad de Svetlichny, no implica necesariamente que no exista otra desigualdad de no-localidad que sí sea violada.
- La respuesta no es obvia.

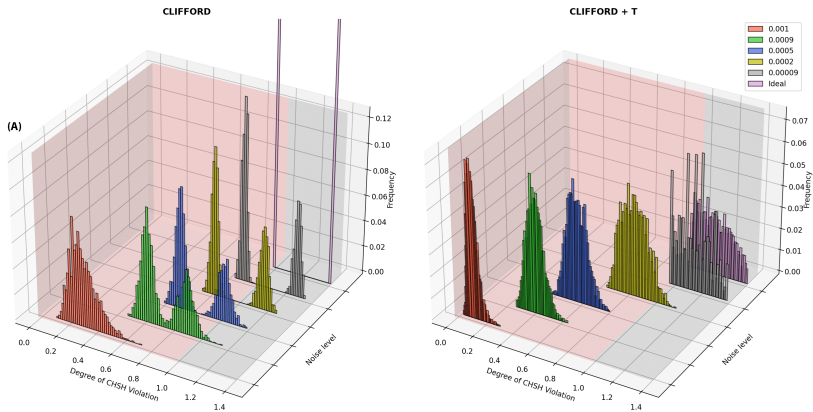
Volumen del conjunto de estados con no-localidad multipartita genuina

- ¿Cuál es el **volúmen** (relativo) del conjunto de estados con no-localidad multipartita genuina a medida que crece n ?
- **Conjetura**: tiende a cero.
- **Observación**: el hecho de que un estado no viole la desigualdad de Svetlichny, no implica necesariamente que no exista otra desigualdad de no-localidad que sí sea violada.
- La respuesta no es obvia.

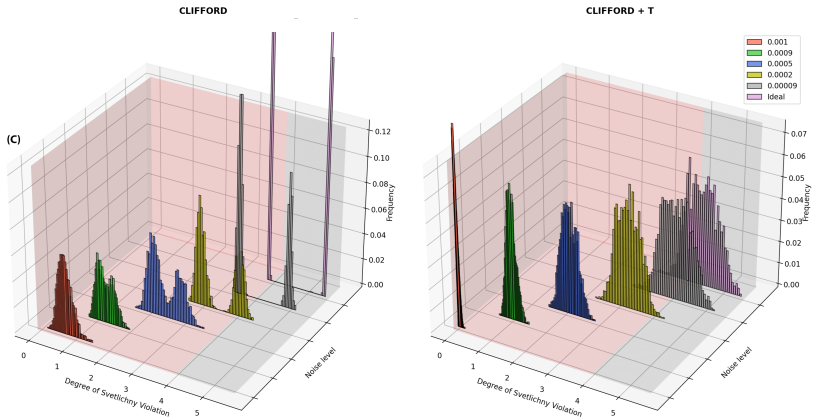
Volumen del conjunto de estados con no-localidad multipartita genuina

- ¿Cuál es el **volúmen** (relativo) del conjunto de estados con no-localidad multipartita genuina a medida que crece n ?
- **Conjetura**: tiende a cero.
- **Observación**: el hecho de que un estado no viole la desigualdad de Svetlichny, no implica necesariamente que no exista otra desigualdad de no-localidad que sí sea violada.
- La respuesta no es obvia.

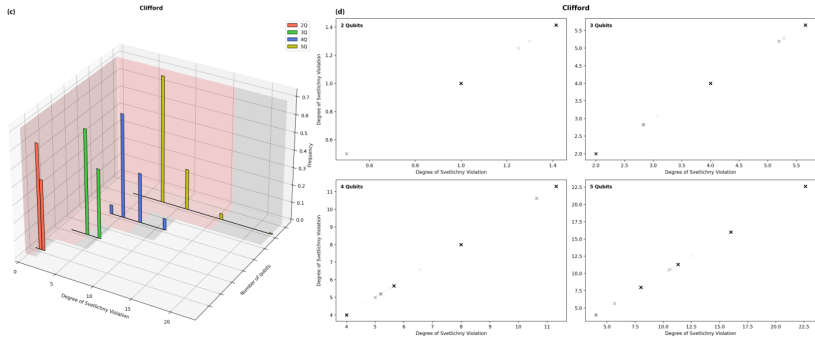
Histogramas de violaciones



Histogramas de violaciones



Histogramas de violaciones (conjunto de Clifford, Svetlichny)



Fracción de violación en función del ruido y la profundidad

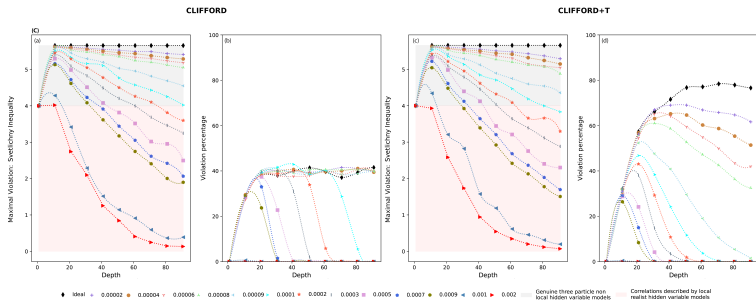


Figure: Valores máximos de violación y fracciones de violación en función de la profundidad para diferentes valores de ruido.

Comparación con el entrelazamiento

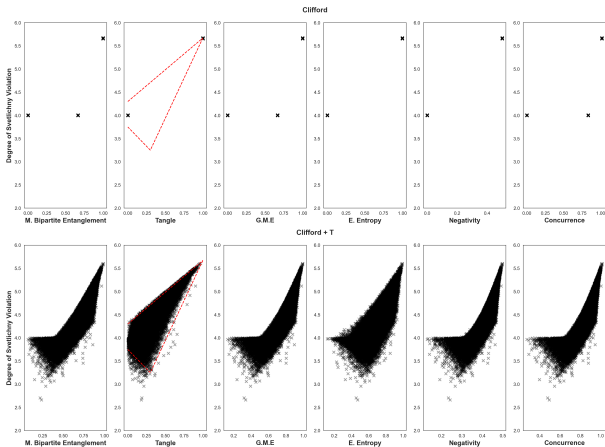


Figure: Diferentes profundidades.

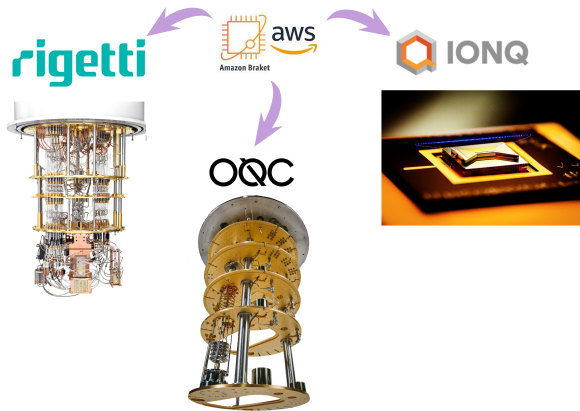
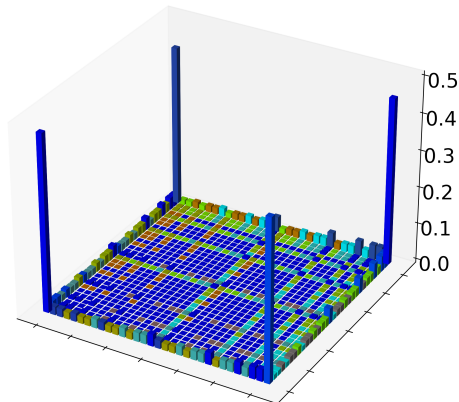


Figure: Proyecto: INNOVA CONICET - AWS (2022-2023).

Desarrollo de plataforma para realizar métodos tomográficos y de certificación.

Características:

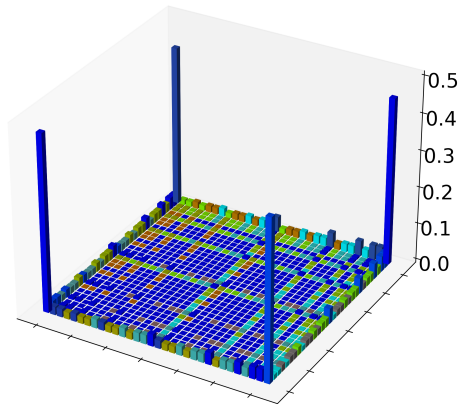
- Estimación de estados cuánticos.
- Detectar entrelazamiento u otros recursos.
- Accesible a un público no tan especializado.
- Que sea "plug and play".



Desarrollo de plataforma para realizar métodos tomográficos y de certificación.

Características:

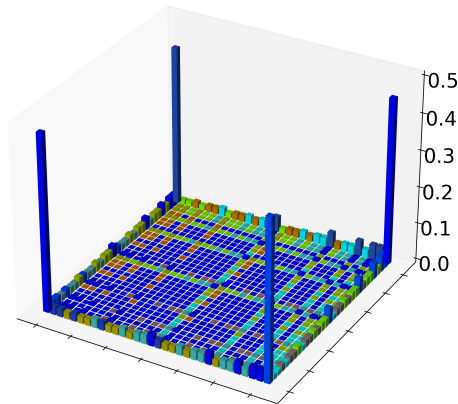
- Estimación de estados cuánticos.
- Detectar entrelazamiento u otros recursos.
- Accesible a un público no tan especializado.
- Que sea "plug and play".



Desarrollo de plataforma para realizar métodos tomográficos y de certificación.

Características:

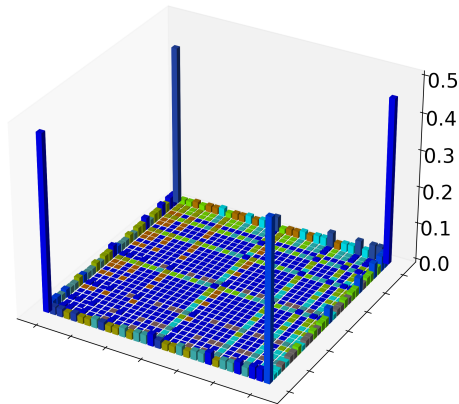
- Estimación de estados cuánticos.
- Detectar entrelazamiento u otros recursos.
- Accesible a un público no tan especializado.
- Que sea "plug and play".



Desarrollo de plataforma para realizar métodos tomográficos y de certificación.

Características:

- Estimación de estados cuánticos.
- Detectar entrelazamiento u otros recursos.
- Accesible a un público no tan especializado.
- Que sea "plug and play".



T : |0|1|2|3|4|5|6|

q0 : -H-C-----

|

q1 : ---X-C-----

|

q2 : ----X-C-----

|

q3 : -----X-C----

|

q4 : -----X-C---

|

q5 : -----X-C-

|

q6 : -----X-

T : |0|1|2|3|4|5|6|

Circuito de un estado GHZ
de 7 qubits.

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0000000\rangle + |1111111\rangle).$$

Con Braket pudimos:

- Diseñar circuitos para mandar a correr en **simuladores** (integrados en la API).
- Diseñar circuitos para mandar a correr a **computadoras cuánticas** (IonQ, Rigetti, Oxford Quantum Computing).

T : |0|1|2|3|4|5|6|

q0 : -H-C-----

|

q1 : ---X-C-----

|

q2 : ----X-C-----

|

q3 : -----X-C----

|

q4 : -----X-C---

|

q5 : -----X-C-

|

q6 : -----X-

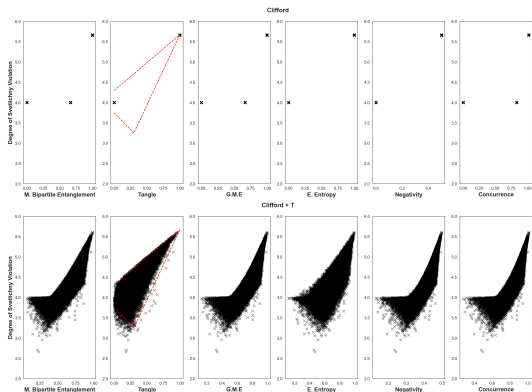
T : |0|1|2|3|4|5|6|

Circuito de un estado GHZ de 7 qubits.

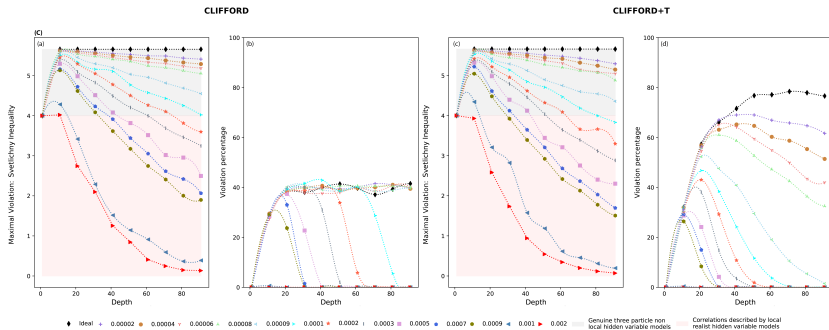
$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0000000\rangle + |1111111\rangle).$$

Con Braket pudimos:

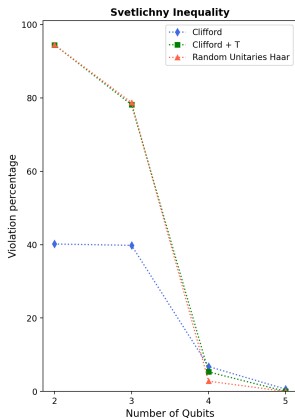
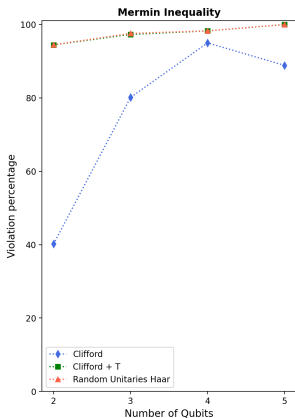
- Diseñar circuitos para mandar a correr en **simuladores** (integrados en la API).
- Diseñar circuitos para mandar a correr a **computadoras cuánticas** (IonQ, Rigetti, Oxford Quantum Computing).



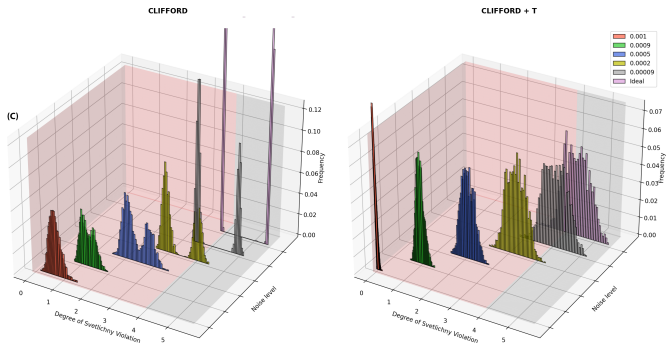
Es interesante ver cómo los recursos se distribuyen y se relacionan entre sí.



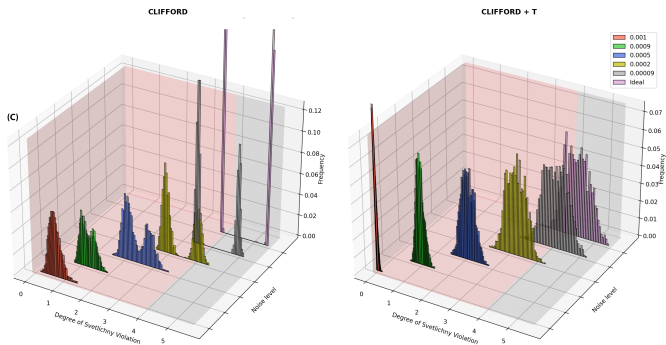
Estudiar cómo se degeneran con el ruido, y dependen de la profundidad y el número de qubits.



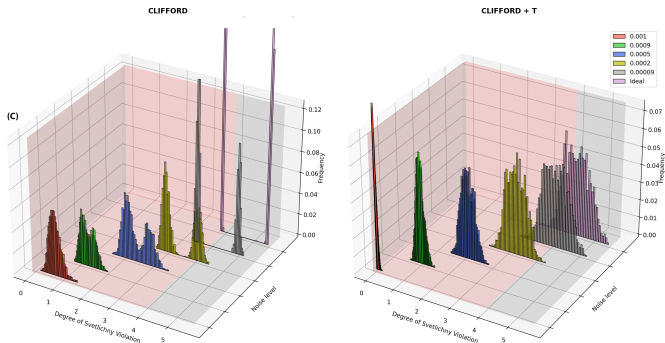
Vimos cómo escala la no-localidad multipartita genuina con el número de qubits.



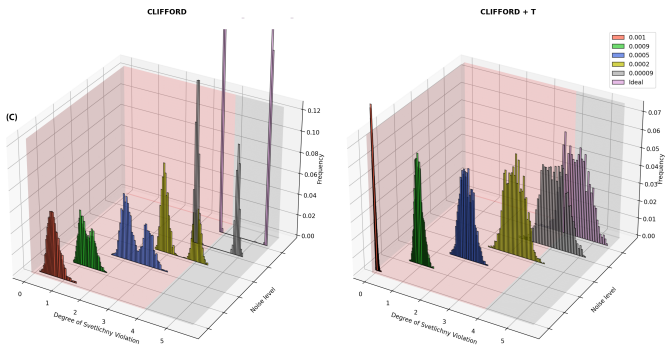
Realizamos una comparación entre conjuntos de compuertas universales vs no-universales (y clásicamente simulables) para diferentes propiedades cuánticas (estudiando cómo se degeneran con el ruido).



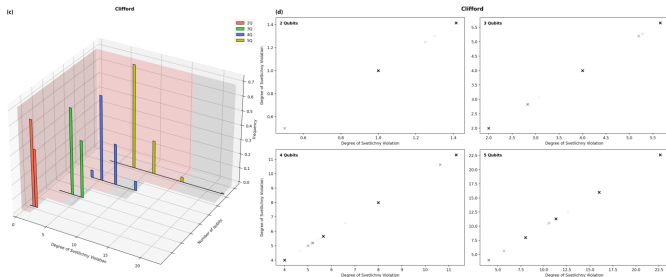
Nuestra comparación entre [Clifford] y [Clifford + T] sugiere que la ventaja cuántica podría estar relacionada a una distribución homogénea de los recursos con respecto a sus valores posibles.



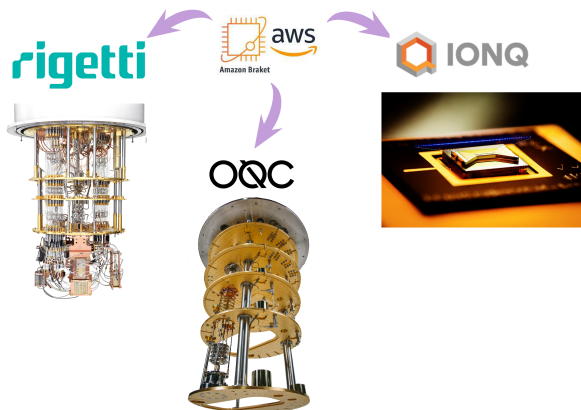
La fortaleza de un dispositivo estaría vinculada a su capacidad de generar todo el espacio de estados cuánticos.



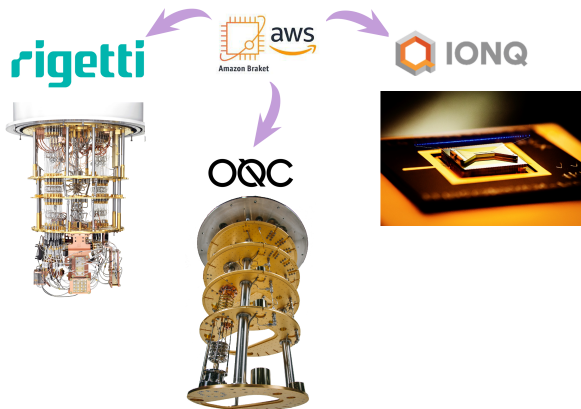
¿Cuánto necesitamos para obtener una ventaja tecnológica? Problema abierto.



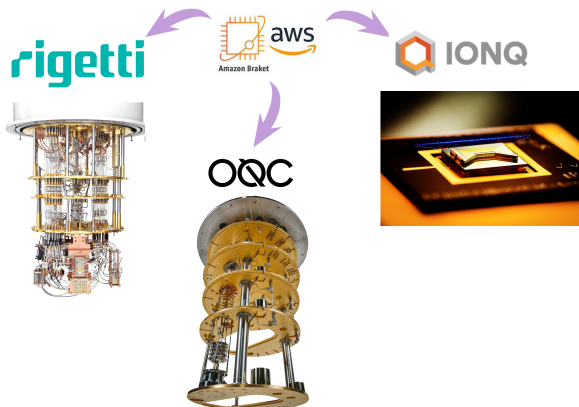
Notar la diferencia con respecto a: “El dispositivo tiene tanta cantidad de X recurso”.



Relevancia para el problema de la certificación: cuantificar hasta qué punto un dispositivo puede reproducir la distribución ideal de recursos.



El desarrollo de software para tareas de certificación debe tener en cuenta cómo tratar con recursos cuánticos limitados y arquitecturas diferentes (respecto a compuertas nativas, conectividad, niveles de ruido).



Tarea crítica (Grupo de Cagliari): desarrollo de herramientas teóricas y de software para tareas de certificación (plug and play, accesible a usuarios que no sean de física).

LIFIA (Alejandro Fernandez y Marcos Lammers): Estudio del rol de los recursos cuánticos en la ingeniería del software cuántico (con el foco puesto en el uso que se le da a las QPUs en la era NISQ).

IFLP: Software orientado a protocolos de certificación basados en la técnicas de estimación de estados cuánticos usando estados simétricos (con Diego Tielas, Lorena Rebón, Marcelo Losada y Giannina Zerr).

- A. C. Granda Arango, F. H. Holik, G. Sergioli, R. Giuntini, “Geometrical Aspects Of Resources Distribution In Quantum Random Circuits”, arXiv:2405.01650v1 [quant-ph] (2024).
- E. Monchetti, C. Massri, J. A. de Barros and F. H. Holik. “Measure-theoretic approach to negative probabilities”, arXiv:2302.00118v1, (2023).
- F. H. Holik. “Non-Kolmogorovian Probabilities and Quantum Technologies”. *Entropy*, **24**, 1666, (2022).
- F. H. Holik, M. Losada, G. Zerr, L. Rebón and D. Tielas “Group-invariant estimation of symmetric states generated by noisy quantum computers”. Very soon in arXiv, (2024).




XIII CONFERENCE ON QUANTUM FOUNDATIONS ARGENTINA

December 2024, Córdoba, Argentina

 holik@fisica.unlp.edu.ar

 [@fedequantum](https://www.instagram.com/fedequantum)

 www.holik.com.ar / www.quantumlogic.com.ar