

POLITÉCNICA

# MadQCI: una red cuántica metropolitana en Madrid

JJTT RedIris 2023. Tecnologías emergentes

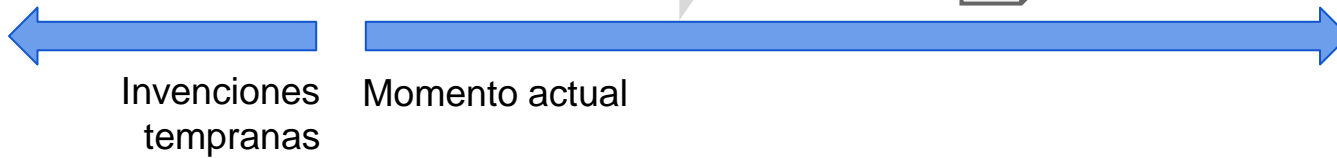
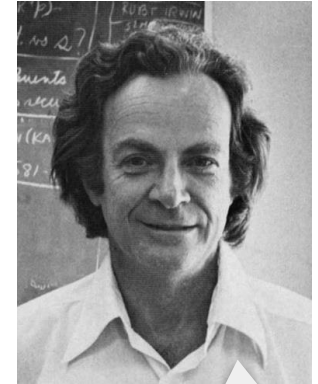
Universidad Politécnica de Madrid  
Centro de Simulación Computacional  
Grupo de Investigación en Información y  
Computación Cuántica

Alberto Sebastián-Lombraña, Laura Ortiz, Juan P. Brito, Rubén B. Méndez, Rafael García, Jaime S. Buruaga, Rafael Artiñano, Daniel Gómez Aguado, Marta Cid, José Luis Bejarano, Vicente Martín.

# Cuántica e información



Richard Feynman



Primera revolución cuántica

- Mecánica Cuántica aplicada

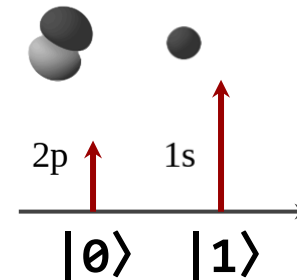


Teoría de la información



Segunda revolución cuántica

- Teoría de la Información Cuántica



**La naturaleza es cuántica, cagüenlá!**  
Por lo que si queremos simularla, necesitamos ordenadores cuánticos.

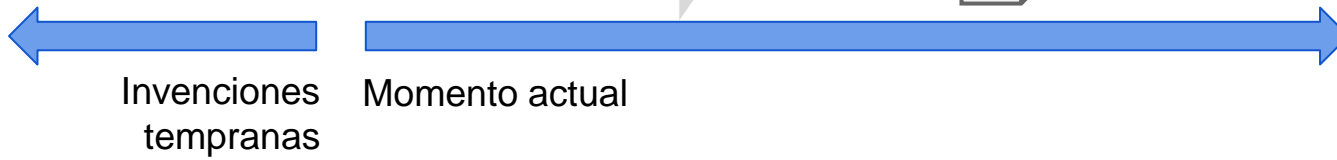
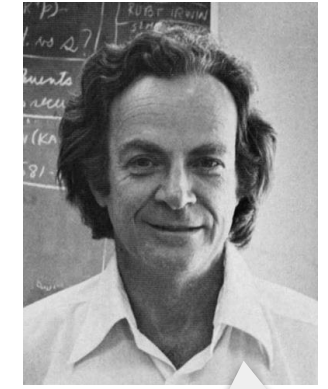
## Paradigma cuántico

- proporciona **recursos nuevos** para una **teoría de la información cuántica** y
- hace posible **técnicas y tecnologías** de la información y comunicación **más ventajosas**.

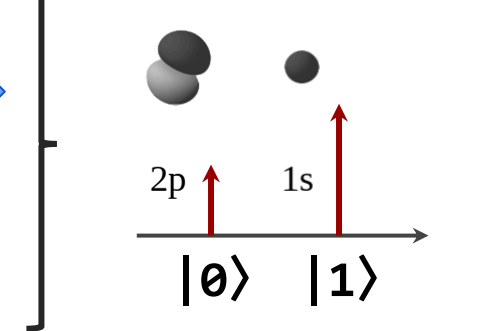
# Cuántica e información



Richard Feynman

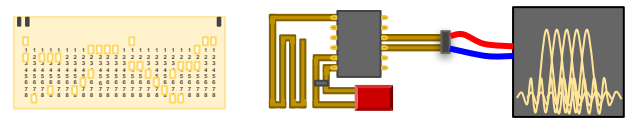


- Mecánica Cuántica aplicada
- Teoría de la información



**La naturaleza es cuántica, cagüenlá!**  
 Por lo que si queremos simularla, necesitamos ordenadores cuánticos.

TIC



TIC<sup>2</sup>

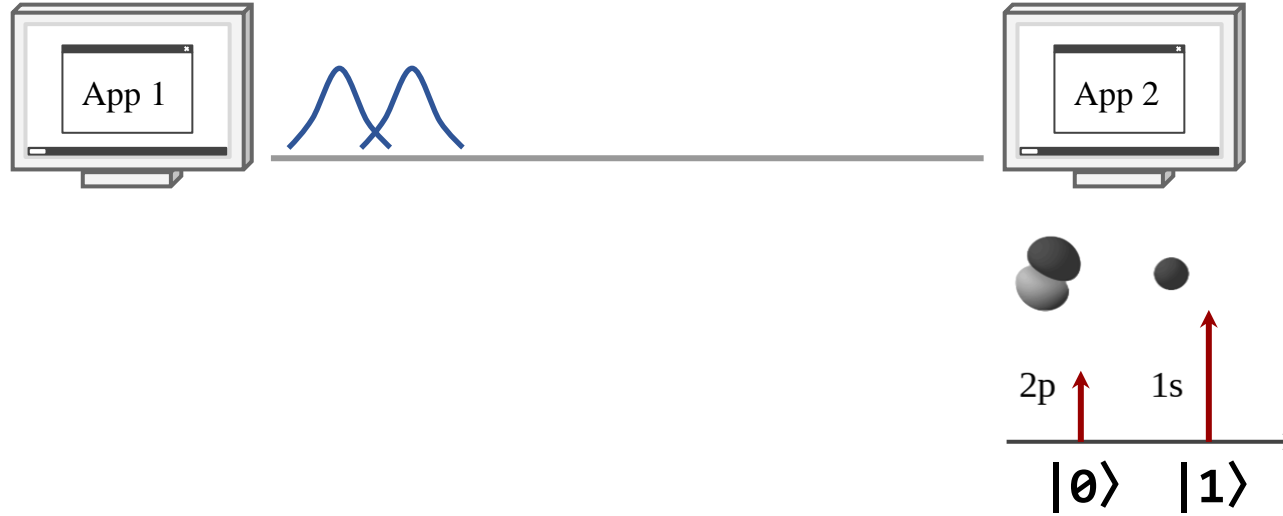
## Paradigma cuántico

- proporciona **recursos nuevos** para una **teoría de la información cuántica** y
- hace posible **técnicas y tecnologías** de la información y comunicación **más ventajosas**.

# Comunicaciones cuánticas



# Comunicaciones cuánticas



# Comunicaciones cuánticas



## Técnicas y tecnologías de **vanguardia**

- Nuevos paradigmas
  - Ventajas
  - Desventajas
- Desafíos
- Oportunidades



Técnicas y tecnologías de **vanguardia**

- Nuevos paradigmas
  - Ventajas
  - Desventajas
- Desafíos
- Oportunidades

- $$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{r}, t) = \hat{H} \Psi(\vec{r}, t)$$

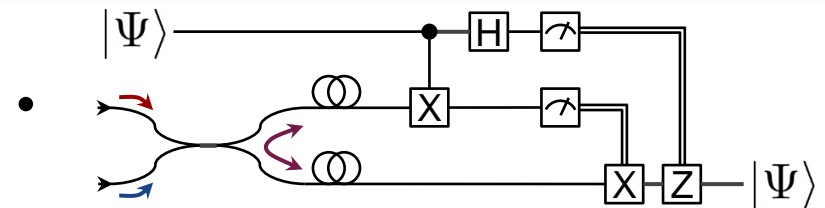
# Comunicaciones cuánticas



## Técnicas y tecnologías de **vanguardia**

- Nuevos paradigmas
  - Ventajas
  - Desventajas
- Desafíos
- Oportunidades

- $$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{r}, t) = \hat{H} \Psi(\vec{r}, t)$$





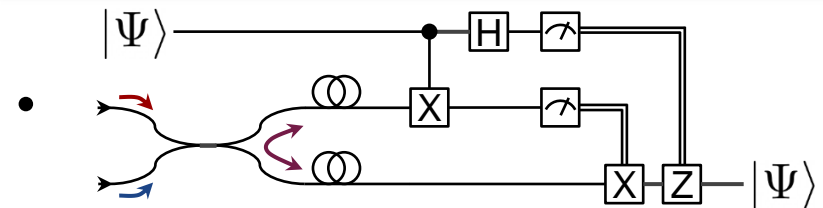
# Comunicaciones cuánticas



## Técnicas y tecnologías de **vanguardia**

- Nuevos paradigmas
  - Ventajas
  - Desventajas
- Desafíos
- Oportunidades

- $$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{r}, t) = \hat{H} \Psi(\vec{r}, t)$$



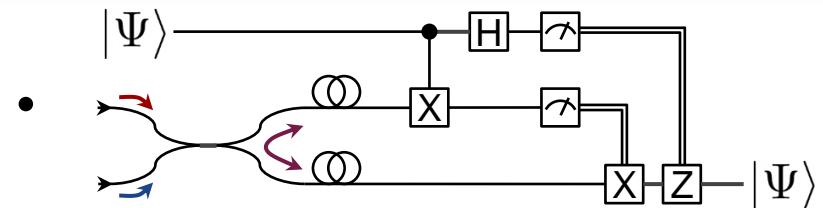
# Comunicaciones cuánticas



## Técnicas y tecnologías de **vanguardia**

- Nuevos paradigmas
  - Ventajas
  - Desventajas
- Desafíos
- Oportunidades

- $$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{r}, t) = \hat{H} \Psi(\vec{r}, t)$$



# Comunicaciones cuánticas



## Técnicas y tecnologías de **vanguardia**

- Nuevos paradigmas
  - Ventajas
  - Desventajas
- Desafíos
- Oportunidades

# Comunicaciones cuánticas



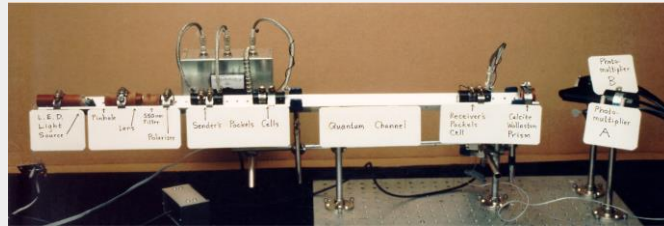
## Técnicas y tecnologías de **vanguardia**

- Nuevos paradigmas
  - Ventajas
  - Desventajas
- Desafíos
- Oportunidades

## Tecnología **madura**

- **comparado** con otras tecnologías de la información cuántica

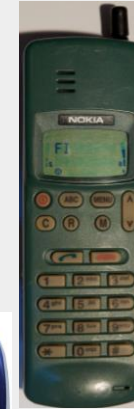
# Comunicaciones cuánticas



1992



2022



Oportunidades

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IBook\\_G3\\_M6497\\_J.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IBook_G3_M6497_J.jpg)

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Powerbook\\_100\\_pose.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Powerbook_100_pose.jpg)

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nokia\\_101\\_THN-6B.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nokia_101_THN-6B.jpg)

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Android\\_foldable\\_phone.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Android_foldable_phone.jpg)

# Comunicaciones cuánticas



## Técnicas y tecnologías de **vanguardia**

- Nuevos paradigmas
  - Ventajas
  - Desventajas
- Desafíos
- Oportunidades

## Tecnología **madura**

- **comparado** con otras tecnologías de la información cuántica

# Comunicaciones cuánticas



## Técnicas y tecnologías de **vanguardia**

- Nuevos paradigmas
  - Ventajas
  - Desventajas
- Desafíos
- Oportunidades

## Tecnología **madura**

- **comparado** con otras tecnologías de la información cuántica

## Tecnología **invisible**

- de nicho y
- sin demanda

# Comunicaciones cuánticas



## Técnicas y tecnologías de **vanguardia**

- Nuevos paradigmas
  - Ventajas
  - Desventajas
- Desafíos
- Oportunidades

**ATENCIÓN**

## Tecnología **madura**

- **comparado** con otras tecnologías de la información cuántica

## Tecnología **invisible**

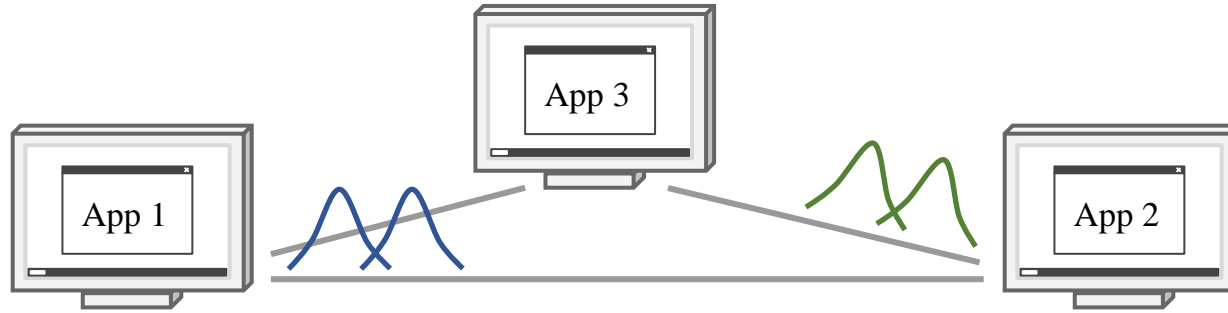
- de nicho y
- sin demanda



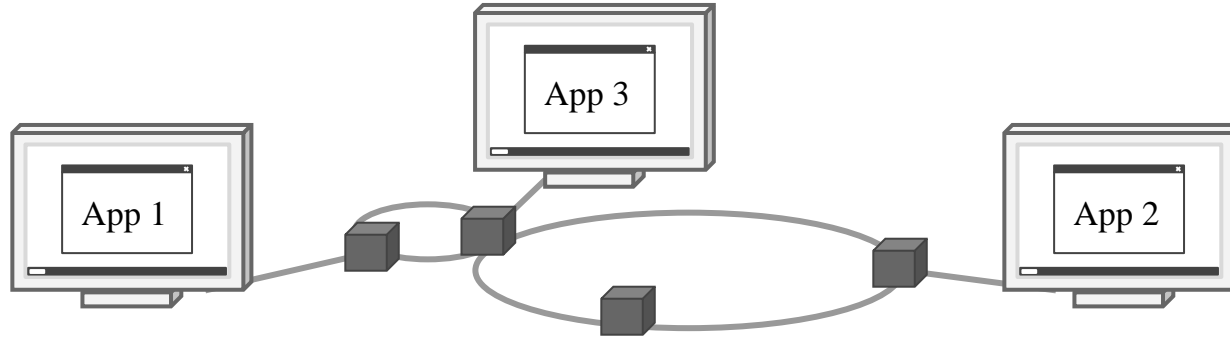
# Comunicaciones cuánticas



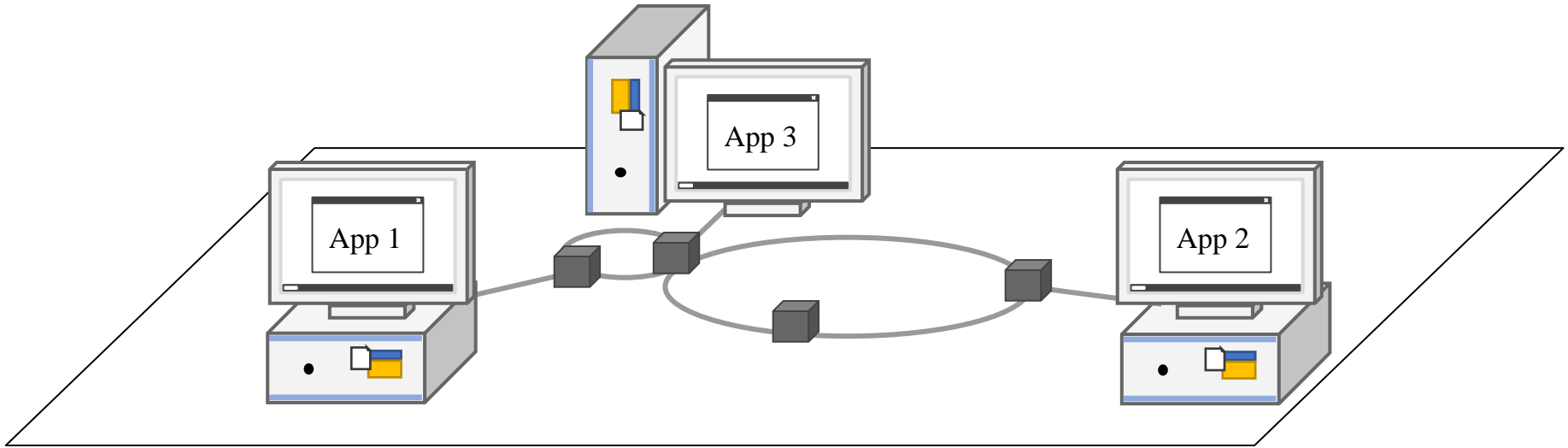
# Comunicaciones cuánticas



# Comunicaciones cuánticas

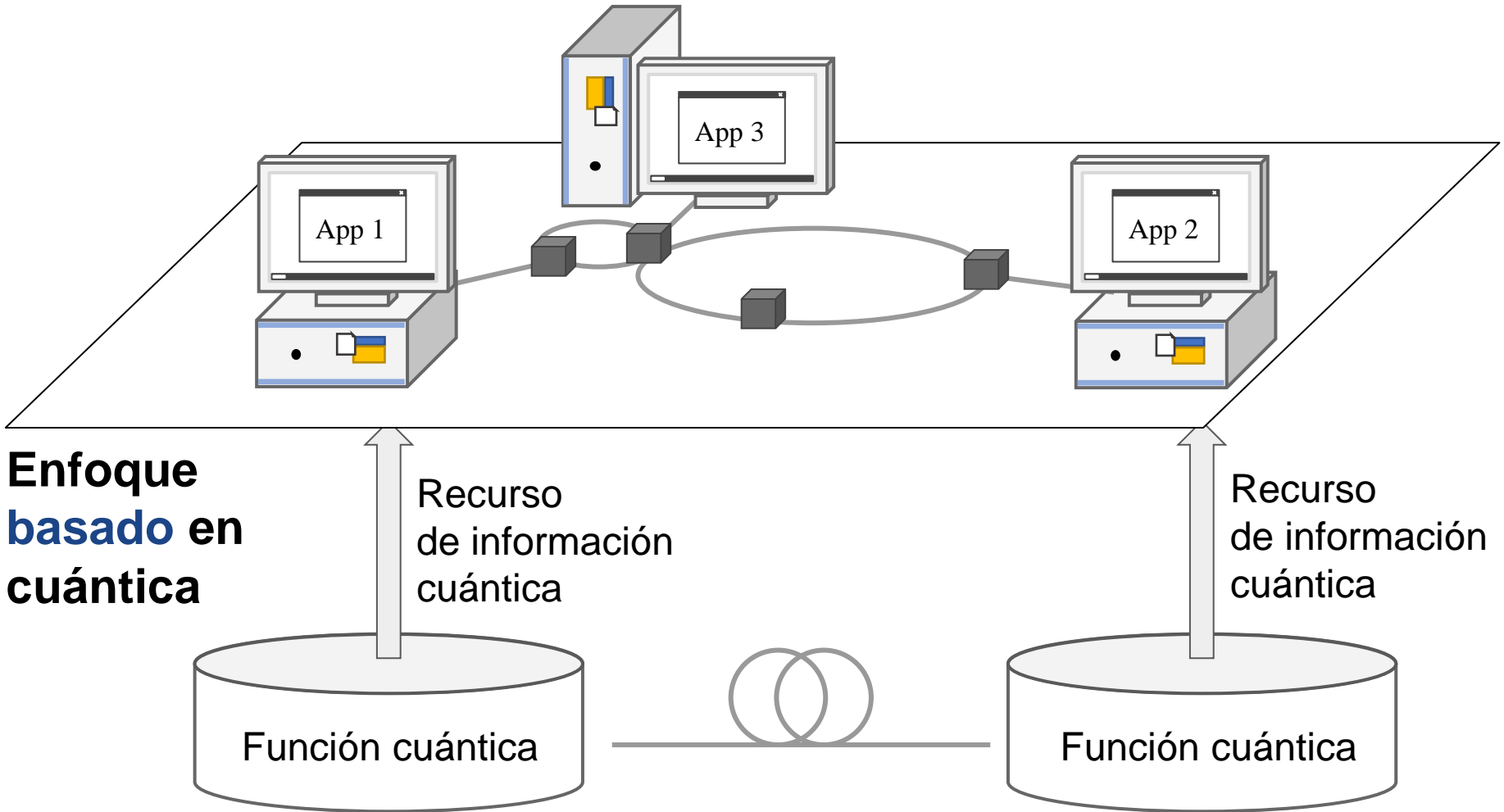


# Comunicaciones cuánticas



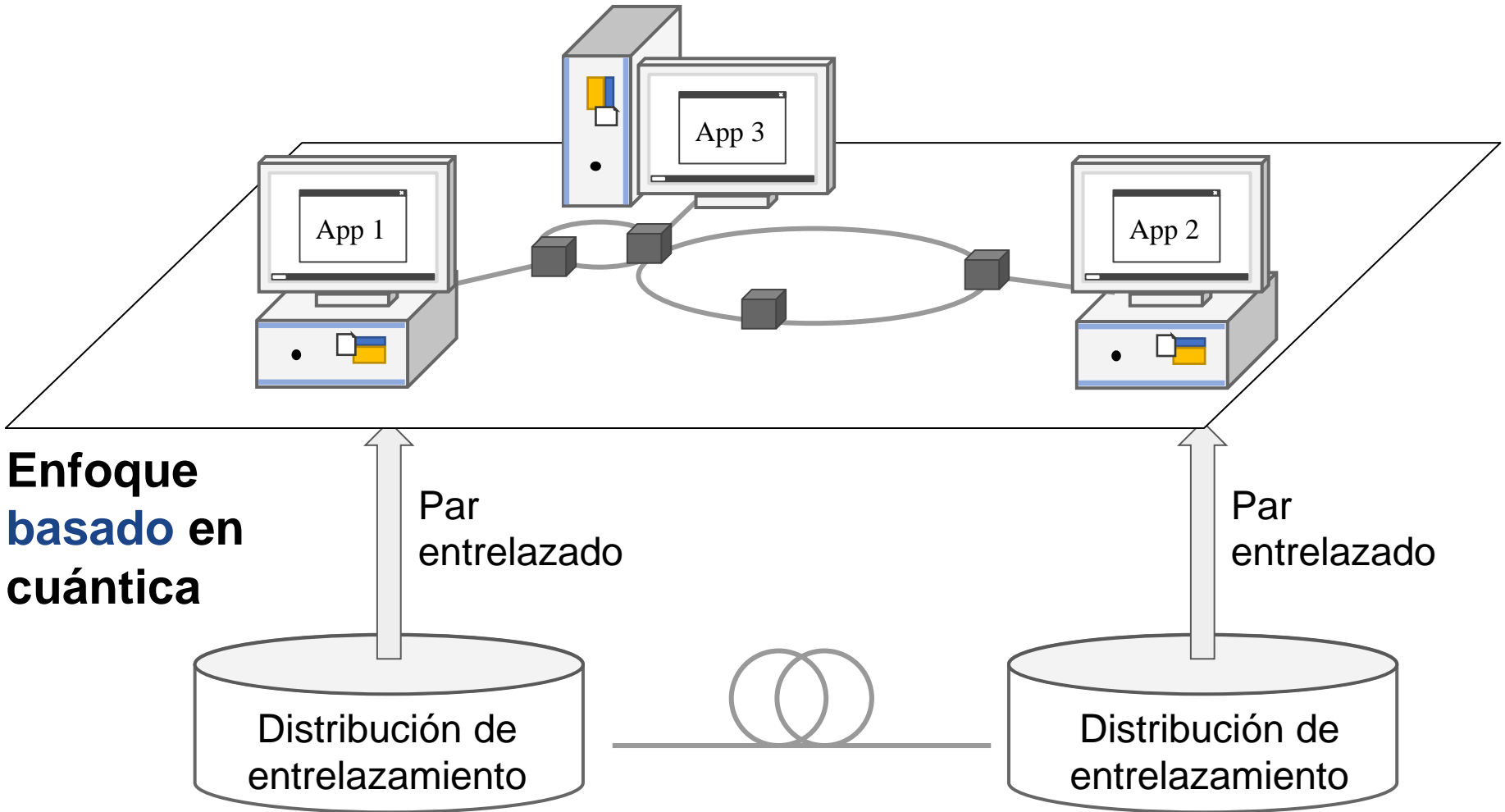
**Enfoque  
basado en  
cuántica**

# Comunicaciones cuánticas



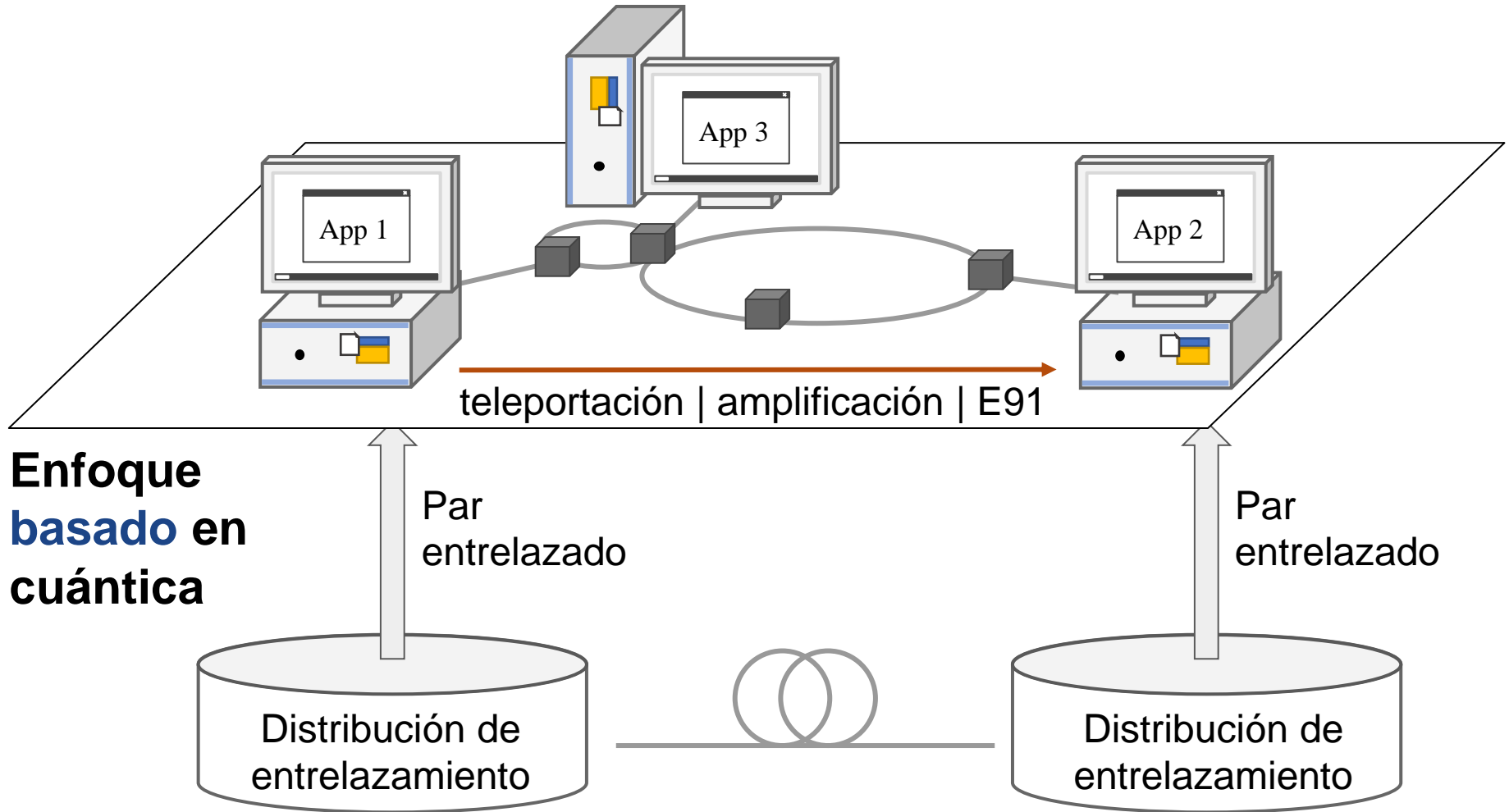
Funciones cuánticas de red

# Comunicaciones cuánticas



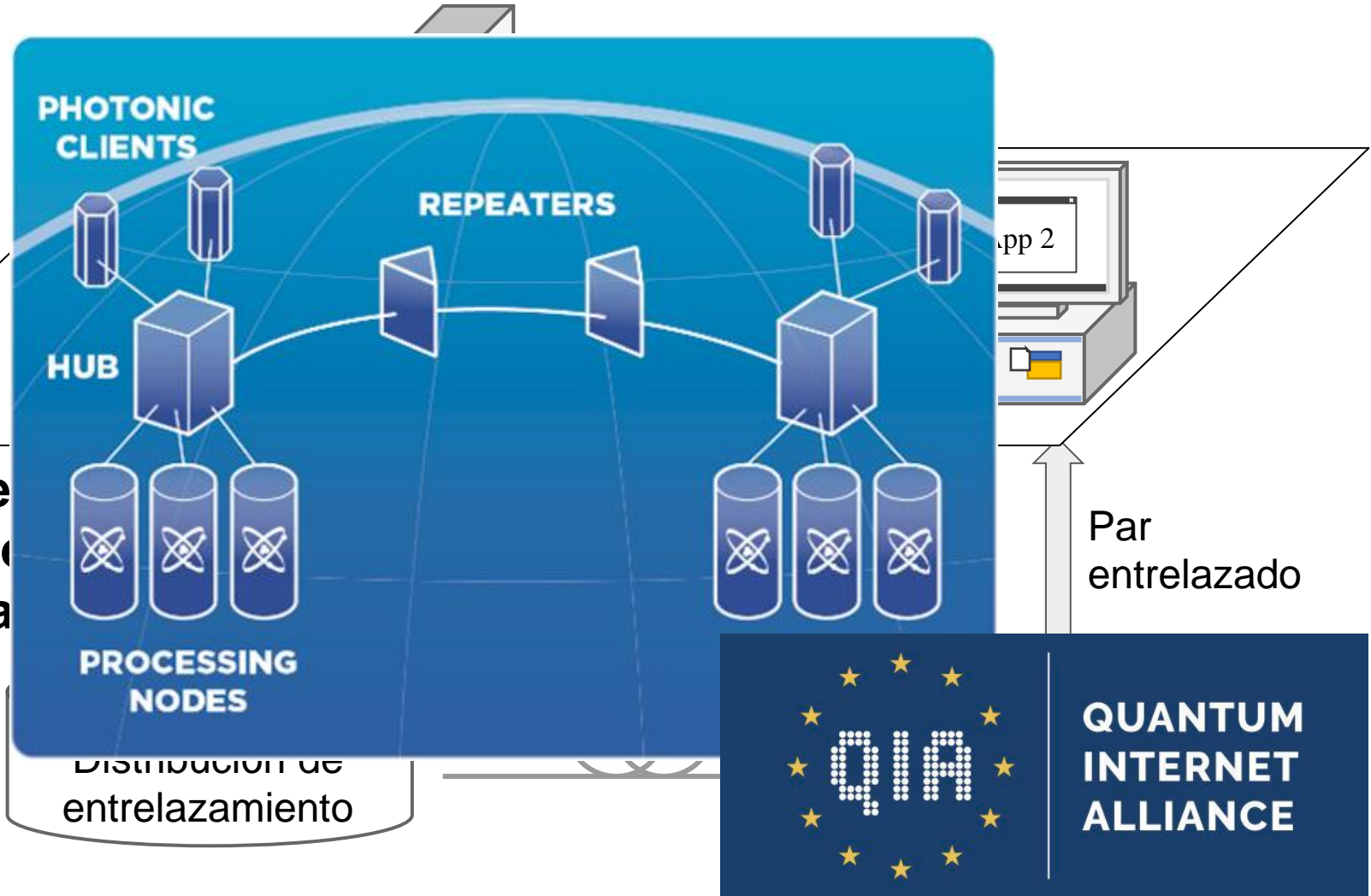
Funciones cuánticas de red

# Comunicaciones cuánticas



Funciones cuánticas de red

# Comunicaciones cuánticas



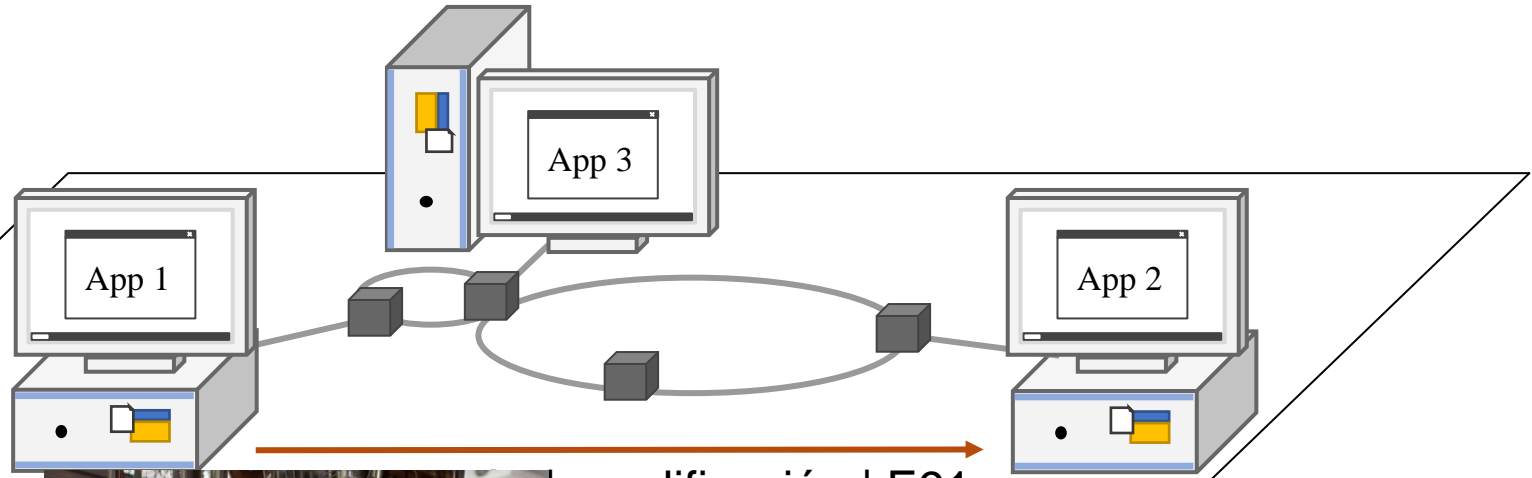
Enfoque  
basado en  
cuántica

Funciones cuánticas de red

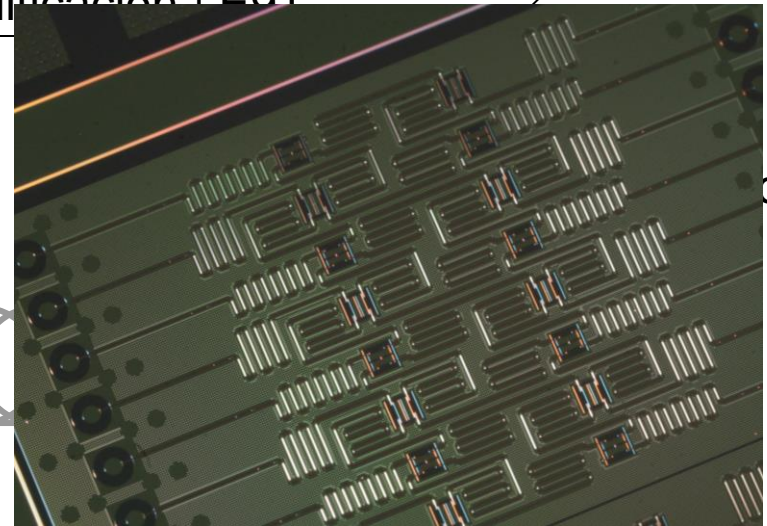
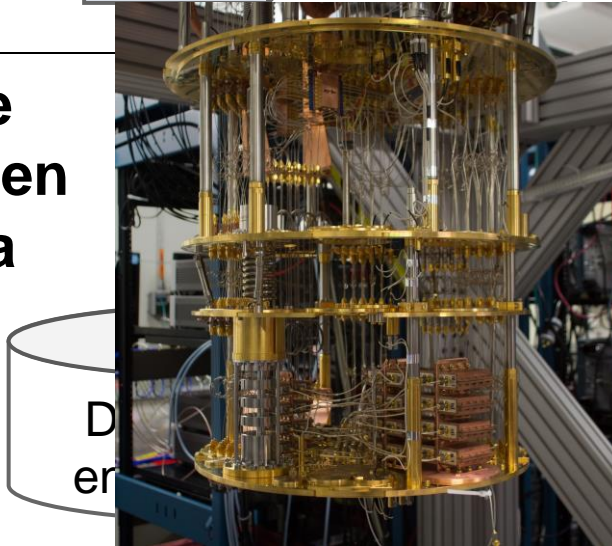
<https://quantum-internet.team>



# Comunicaciones cuánticas



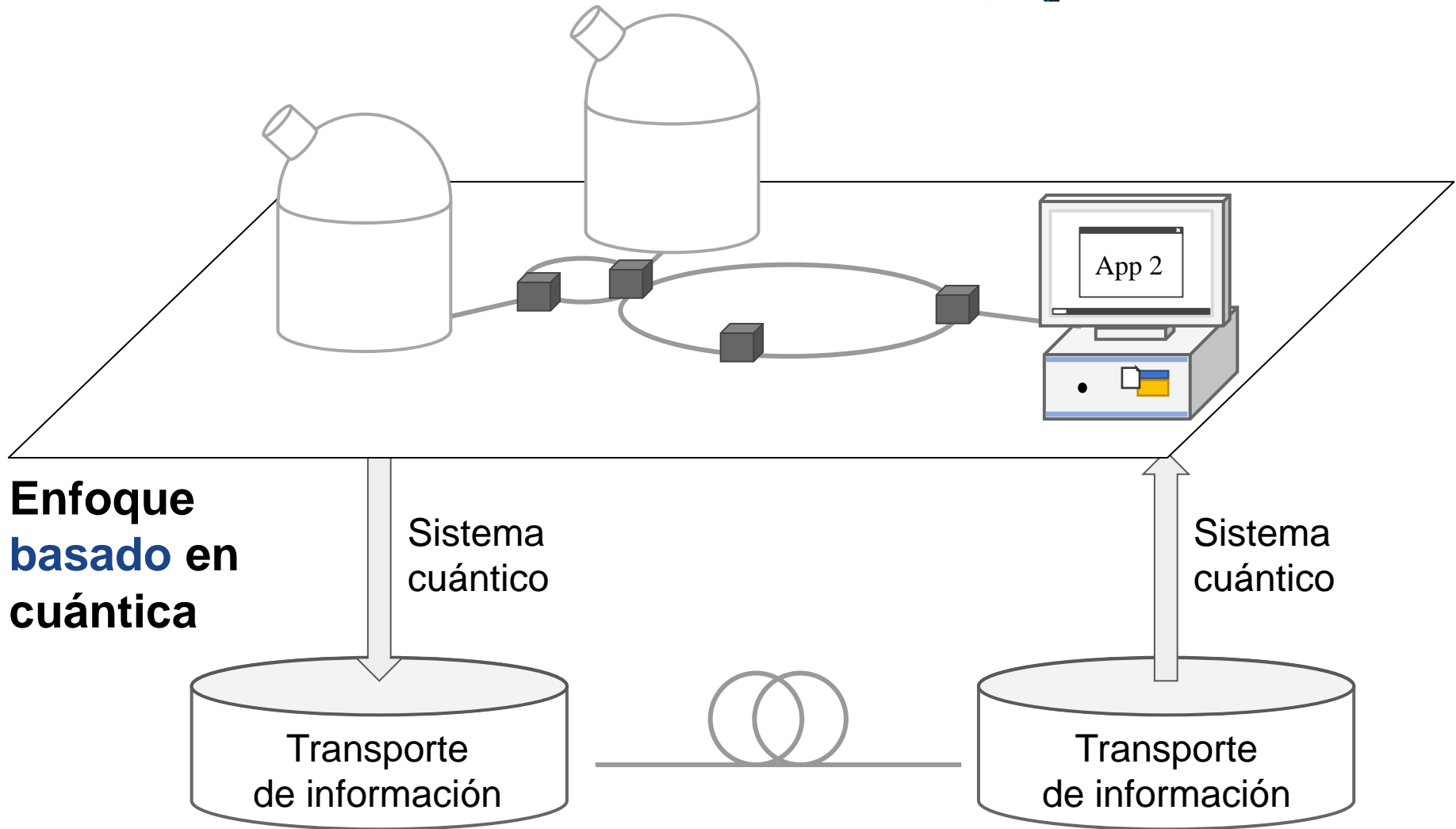
**Enfoque  
basado en  
cuántica**



**Funciones cuánticas de red**

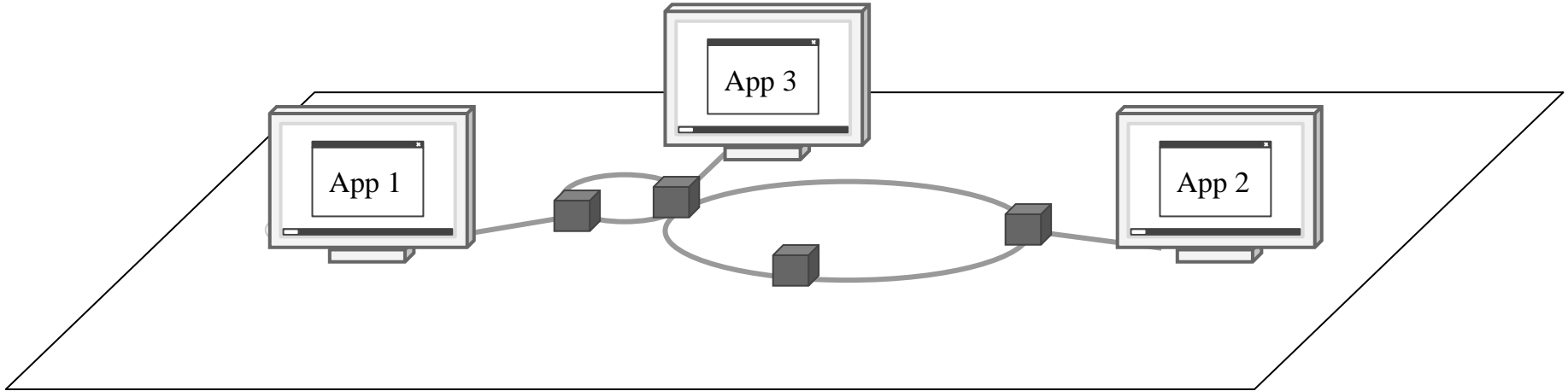
Image source: [https://www.flickr.com/photos/ibm\\_research\\_zurich/32390815144/](https://www.flickr.com/photos/ibm_research_zurich/32390815144/)  
[https://www.flickr.com/photos/ibm\\_research\\_zurich/34315884280/](https://www.flickr.com/photos/ibm_research_zurich/34315884280/)

# Comunicaciones cuánticas

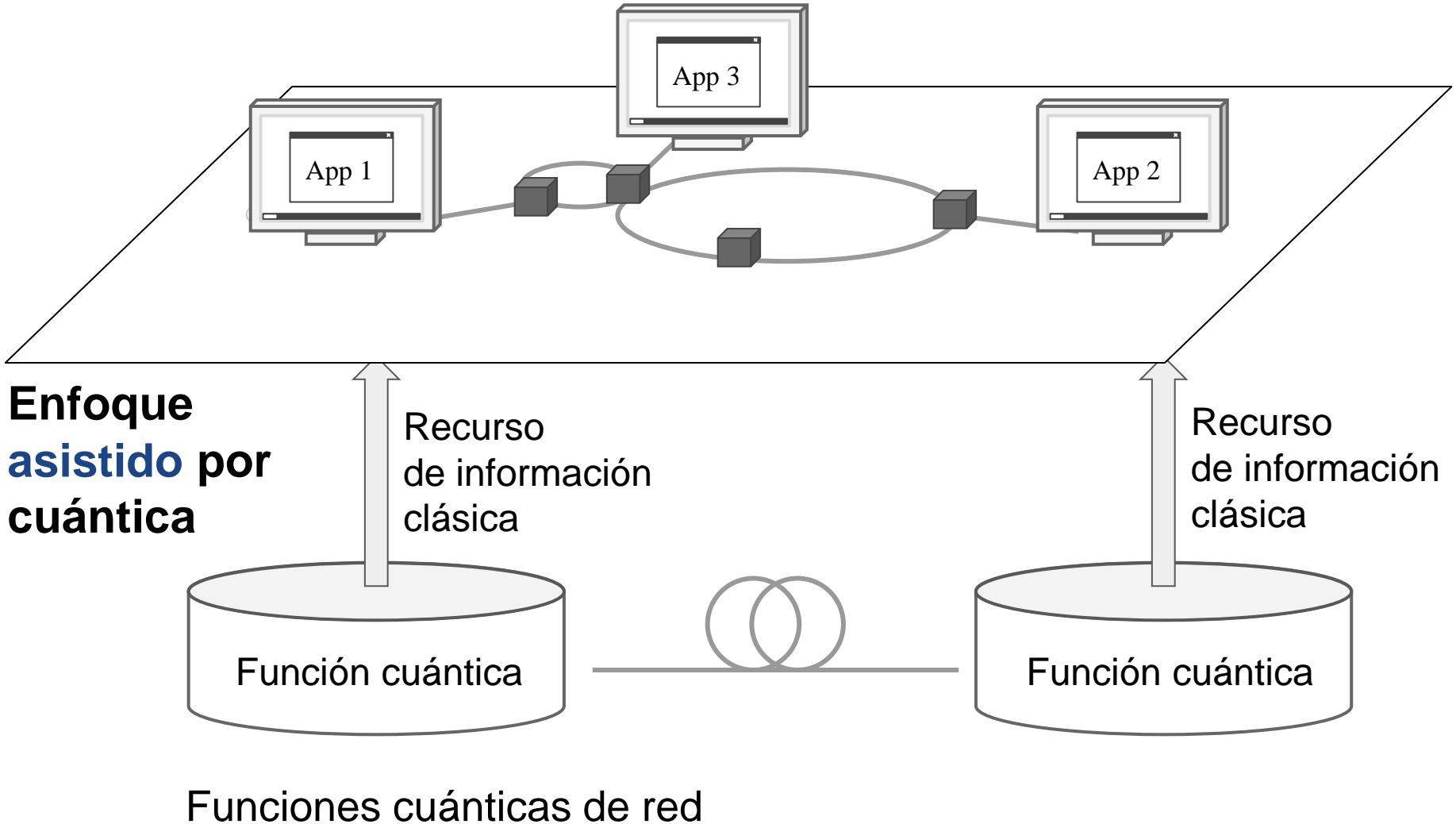


Funciones cuánticas de red

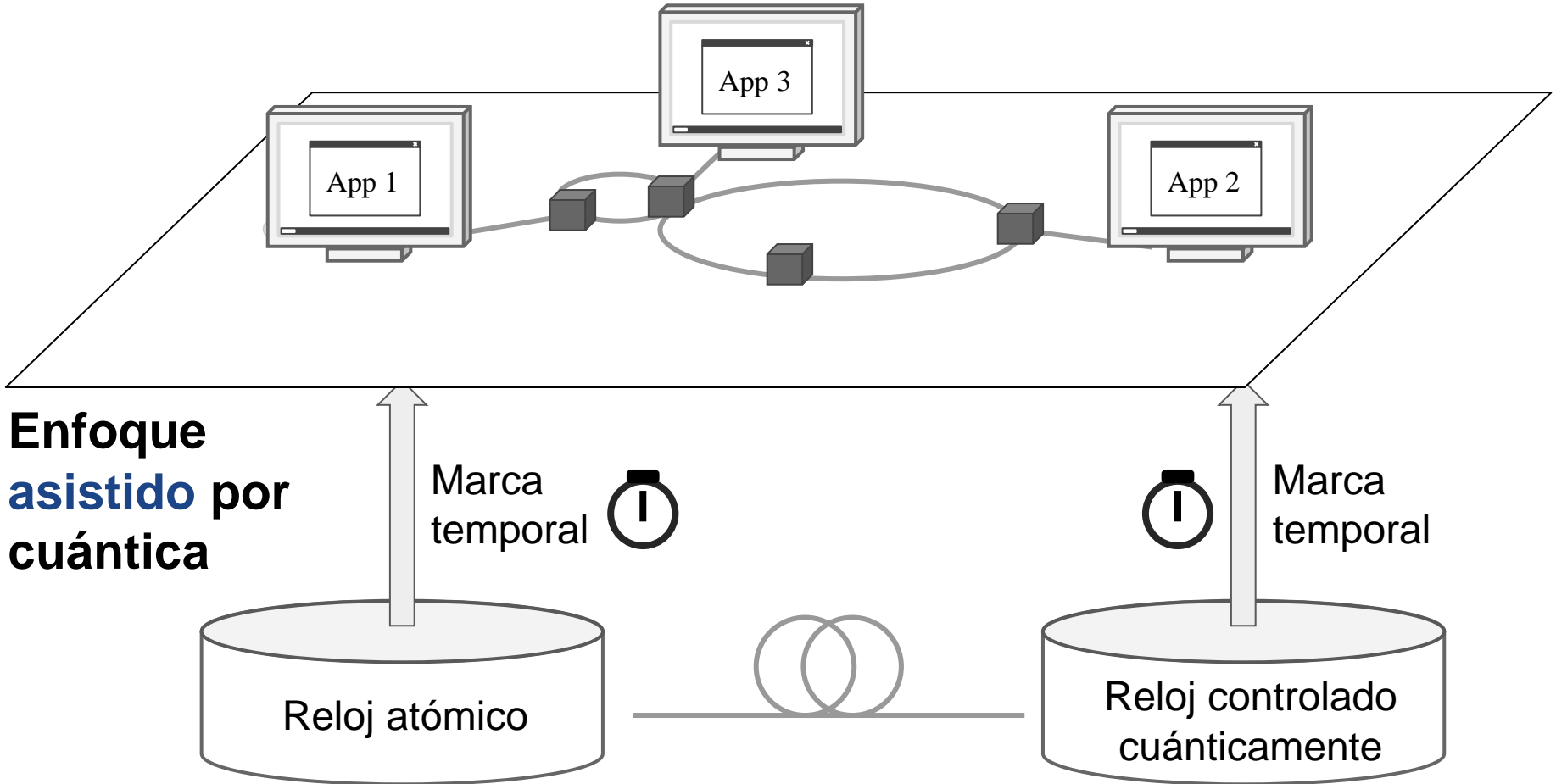
# Comunicaciones cuánticas



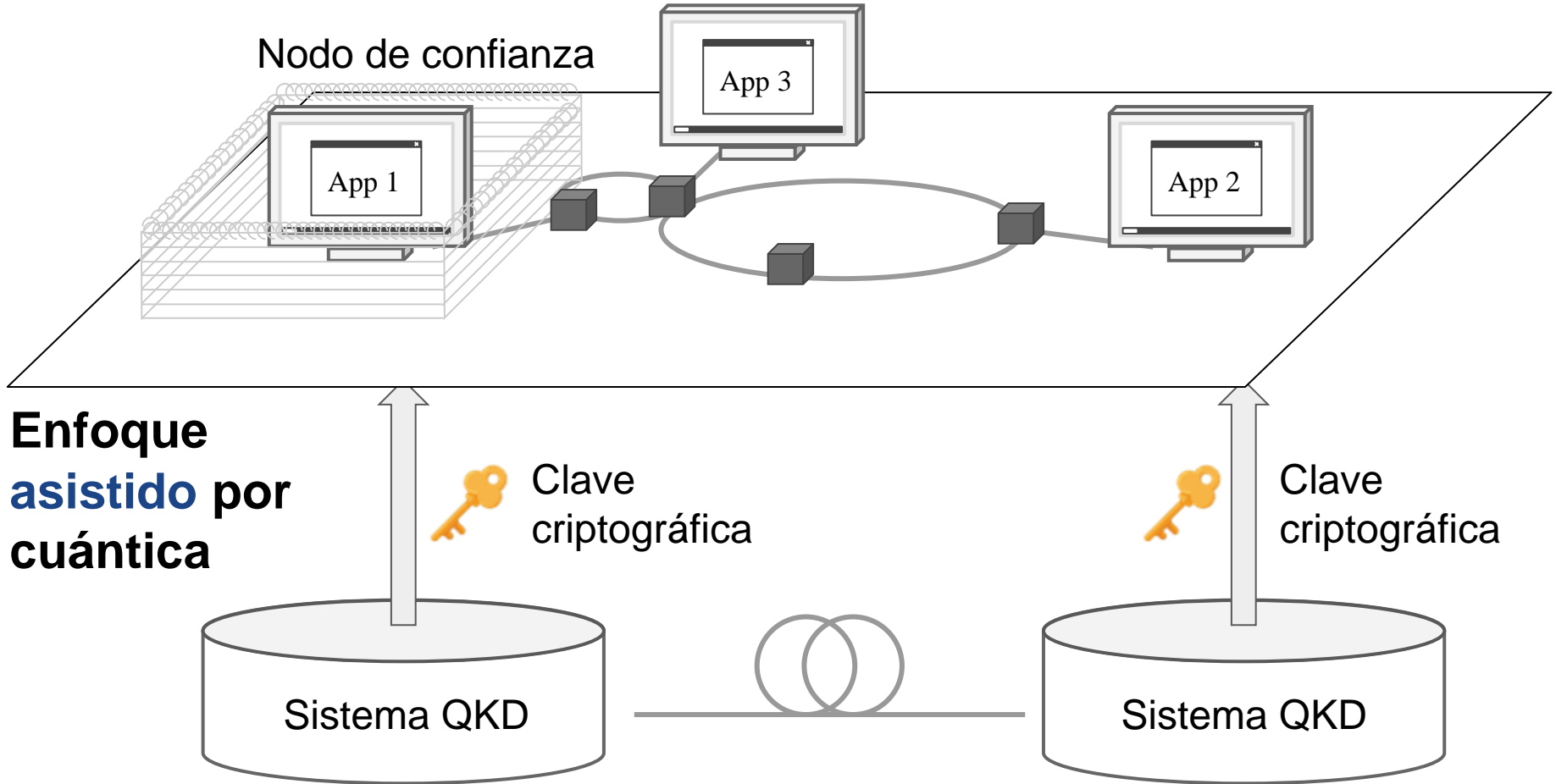
# Comunicaciones cuánticas



# Comunicaciones cuánticas

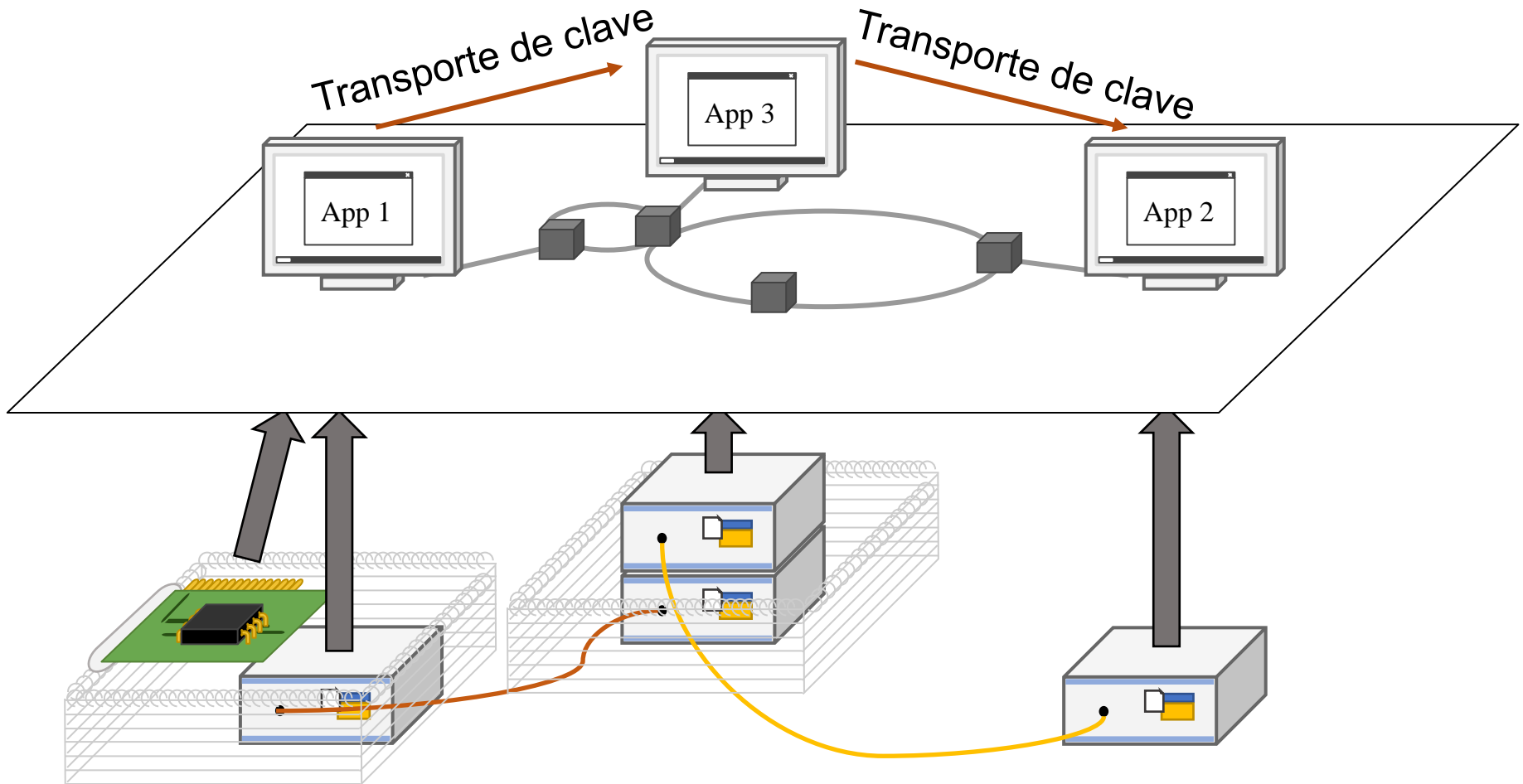


# Criptografía cuántica



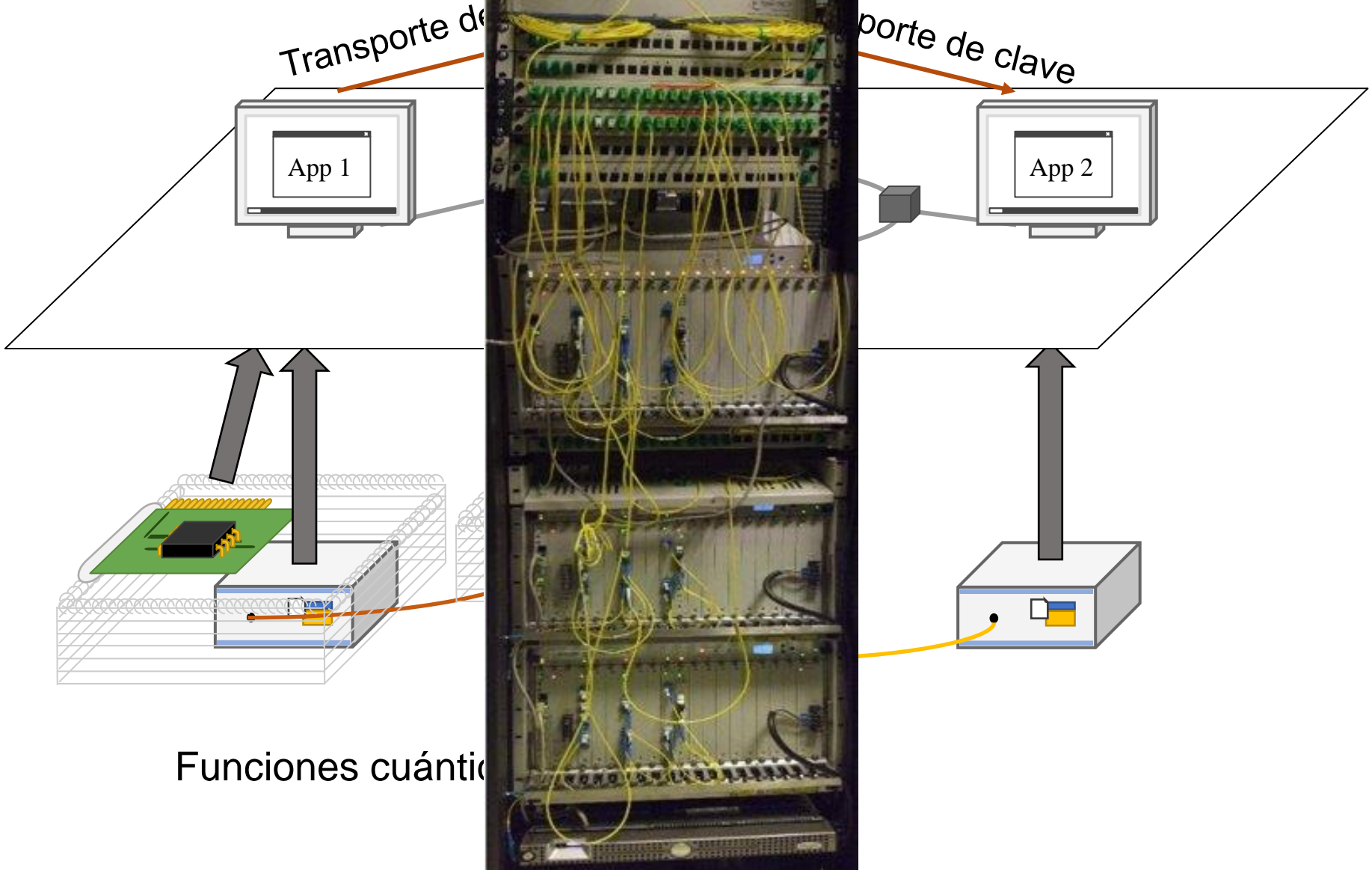
Funciones cuánticas de red

# Criptografía cuántica



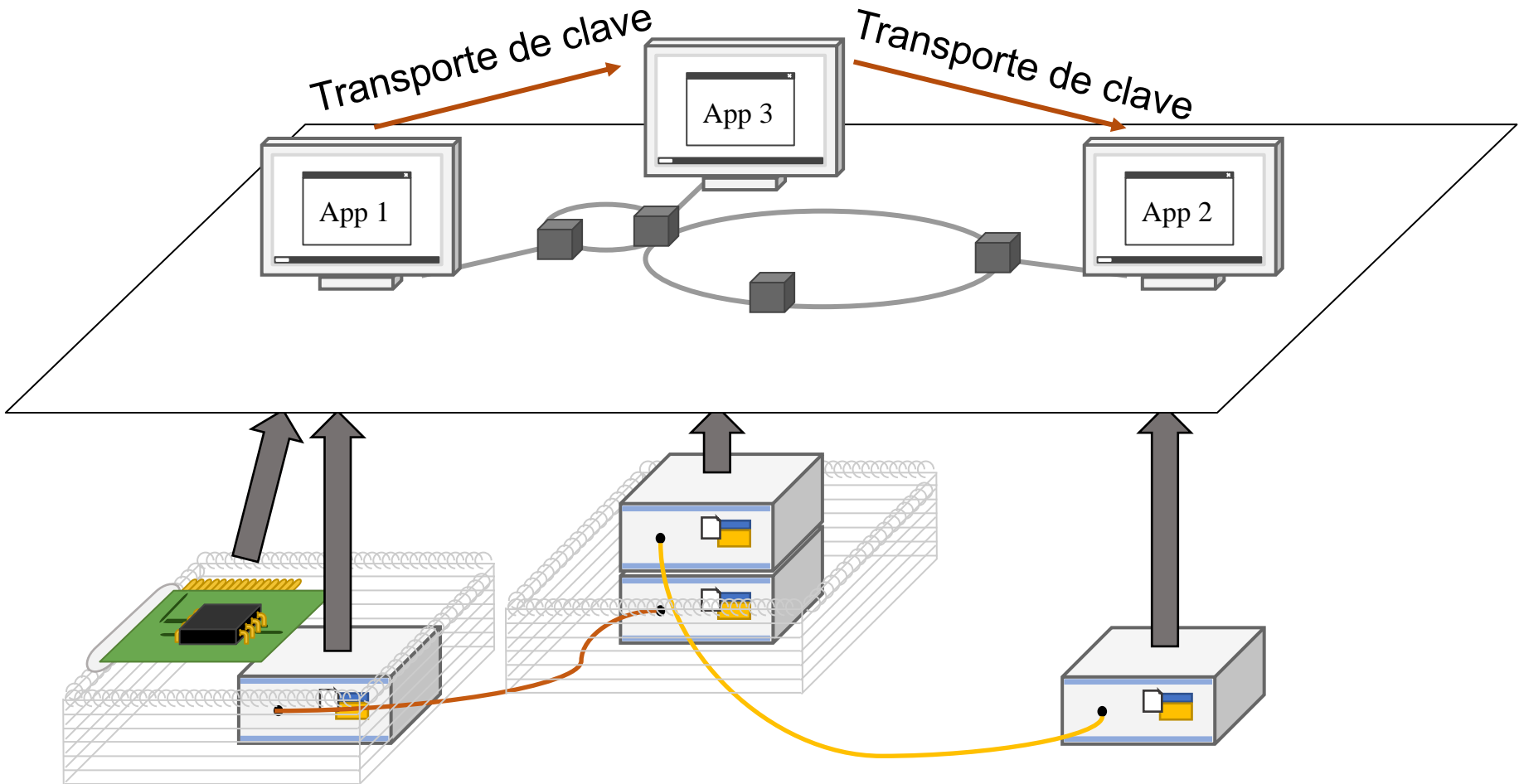
Funciones cuánticas de red

# Criptografía cuántica



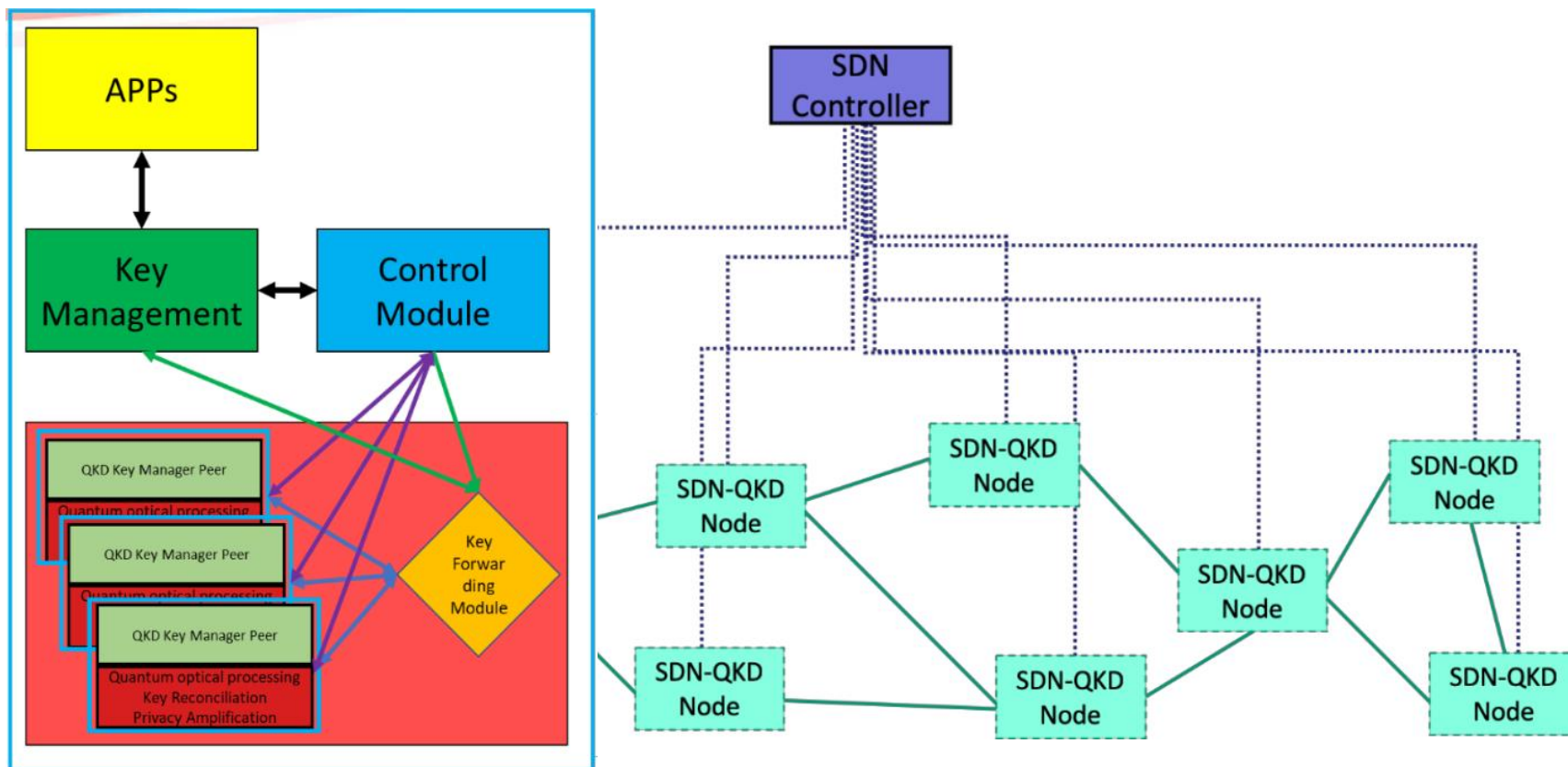


# Criptografía cuántica



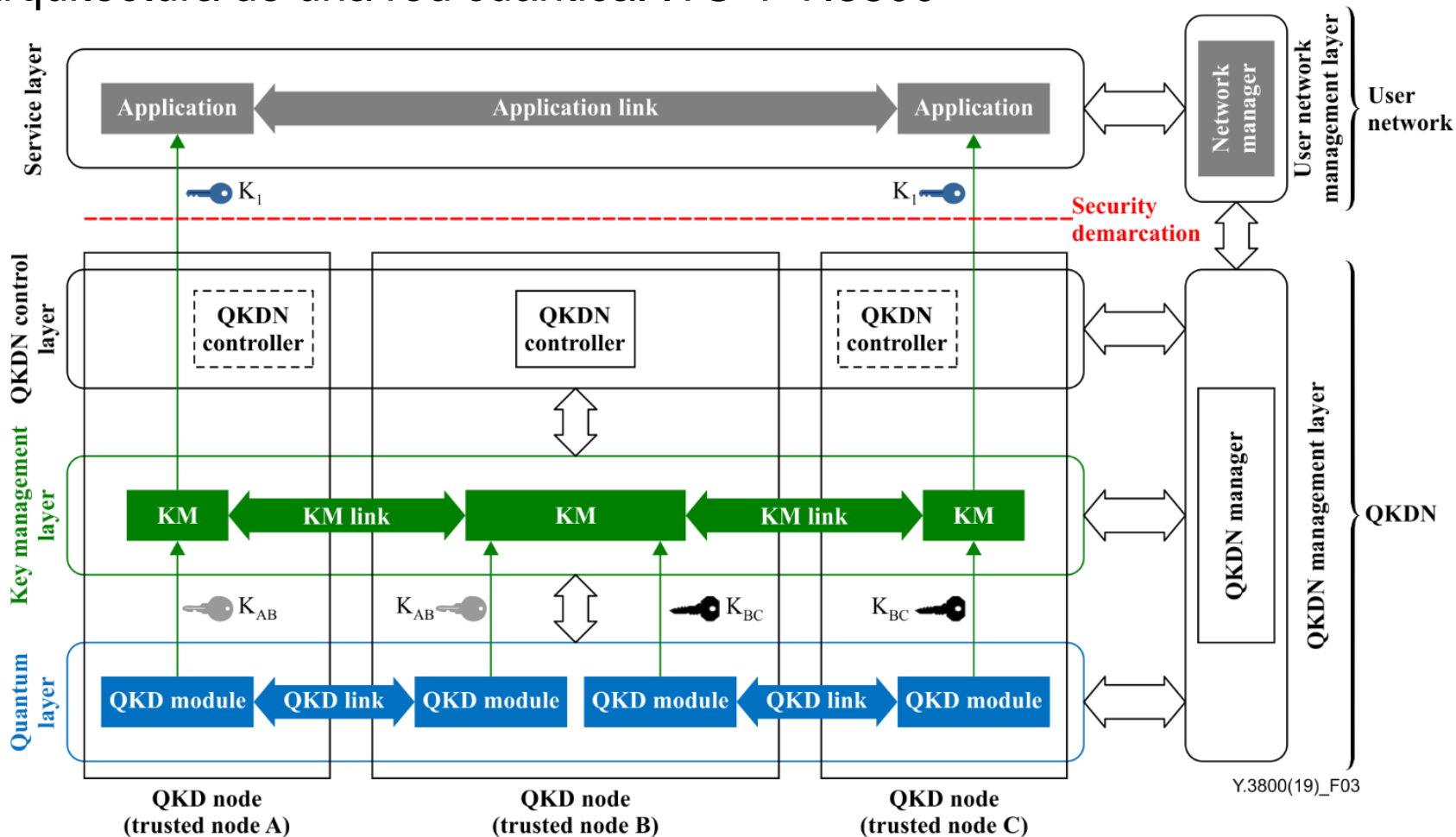
Funciones cuánticas de red

## Arquitectura de una red cuántica. ETSI GS QKD



En **redes programables (SDN)** las funciones de red se envuelven con técnicas propias de la Ingeniería del *software* y se exponen sus capacidades para dotar a la infraestructura de programabilidad

## Arquitectura de una red cuántica. ITU-T Y.3800



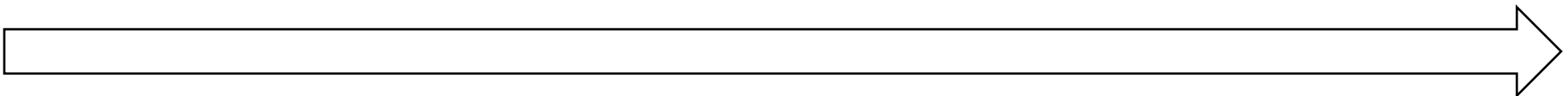
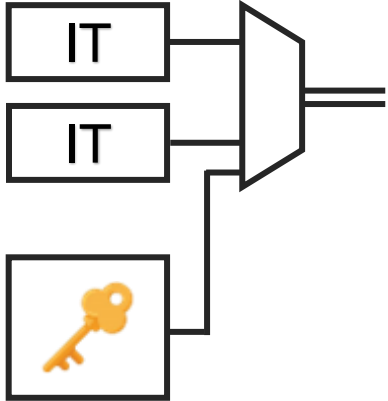
En **redes programables (SDN)** las funciones de red se envuelven con técnicas propias de la Ingeniería del *software* y se exponen sus capacidades para dotar a la infraestructura de programabilidad

# Criptografía cuántica



Proyección

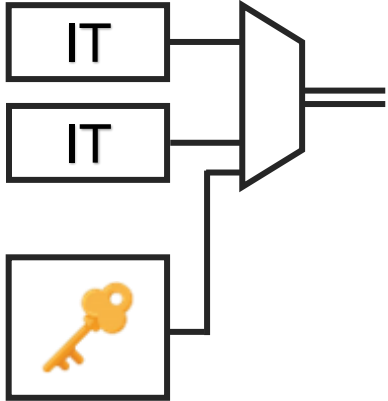
## Experiencia



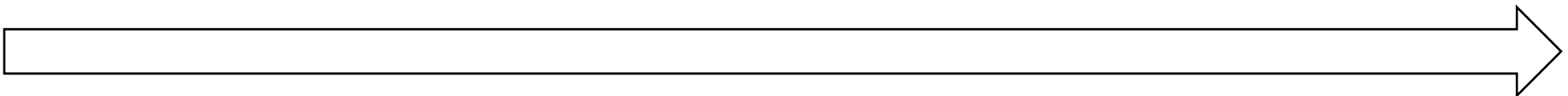
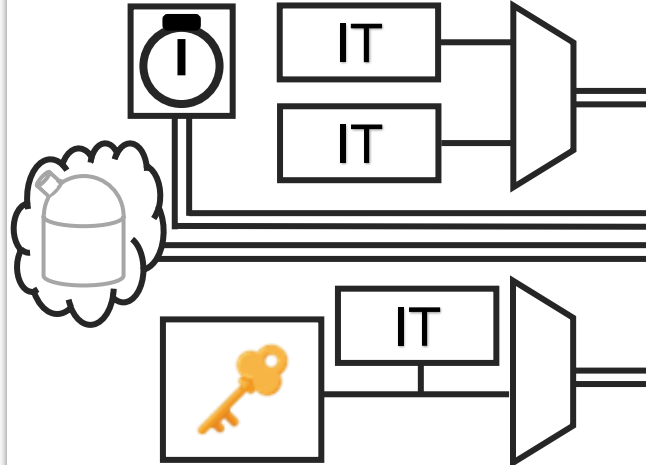
# Criptografía cuántica

## Proyección

### Experiencia



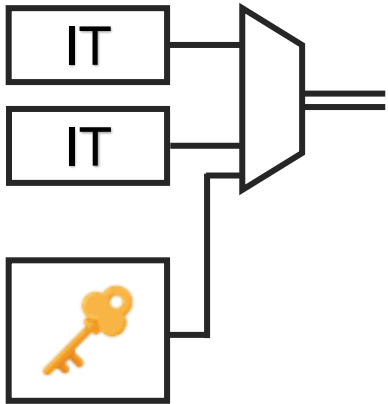
### Coexistencia



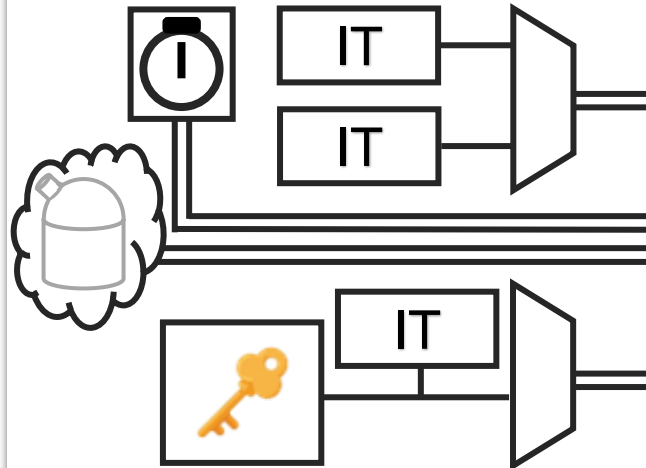
# Criptografía cuántica

## Proyección

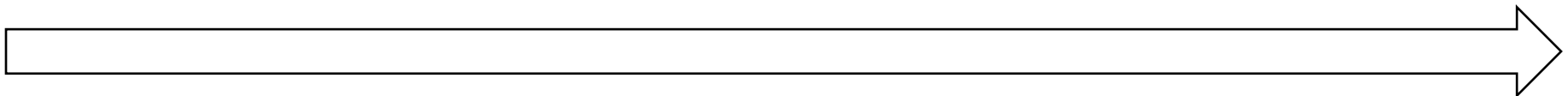
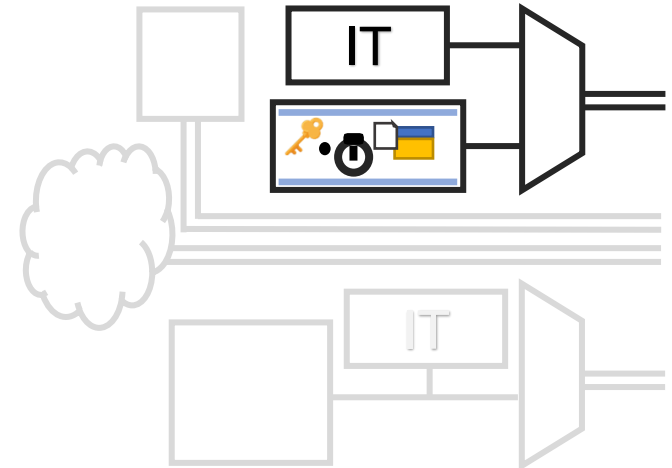
### Experiencia



### Coexistencia



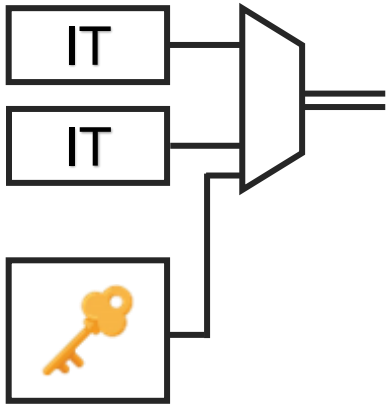
### Integración



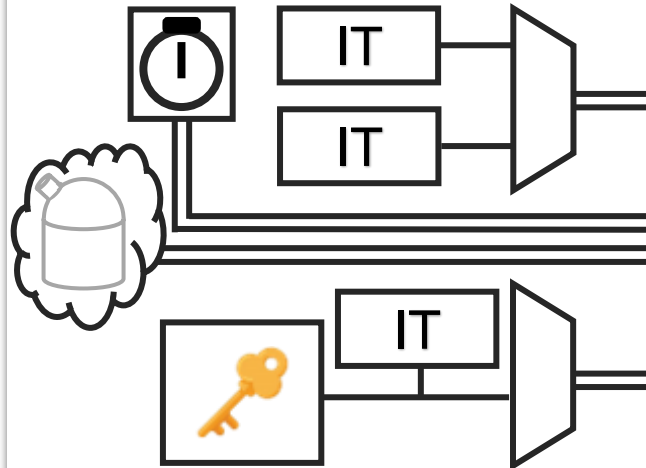
# Criptografía cuántica

## Proyección

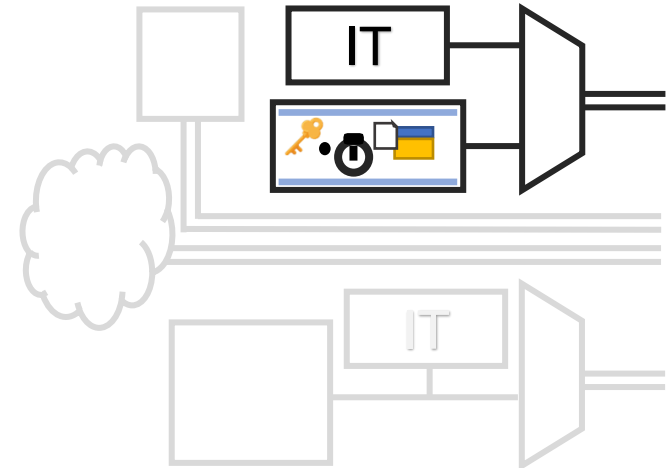
### Experiencia



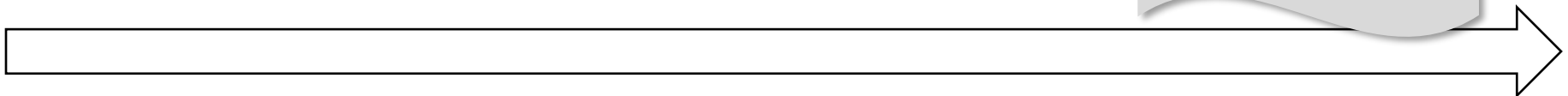
### Coexistencia



### Integración

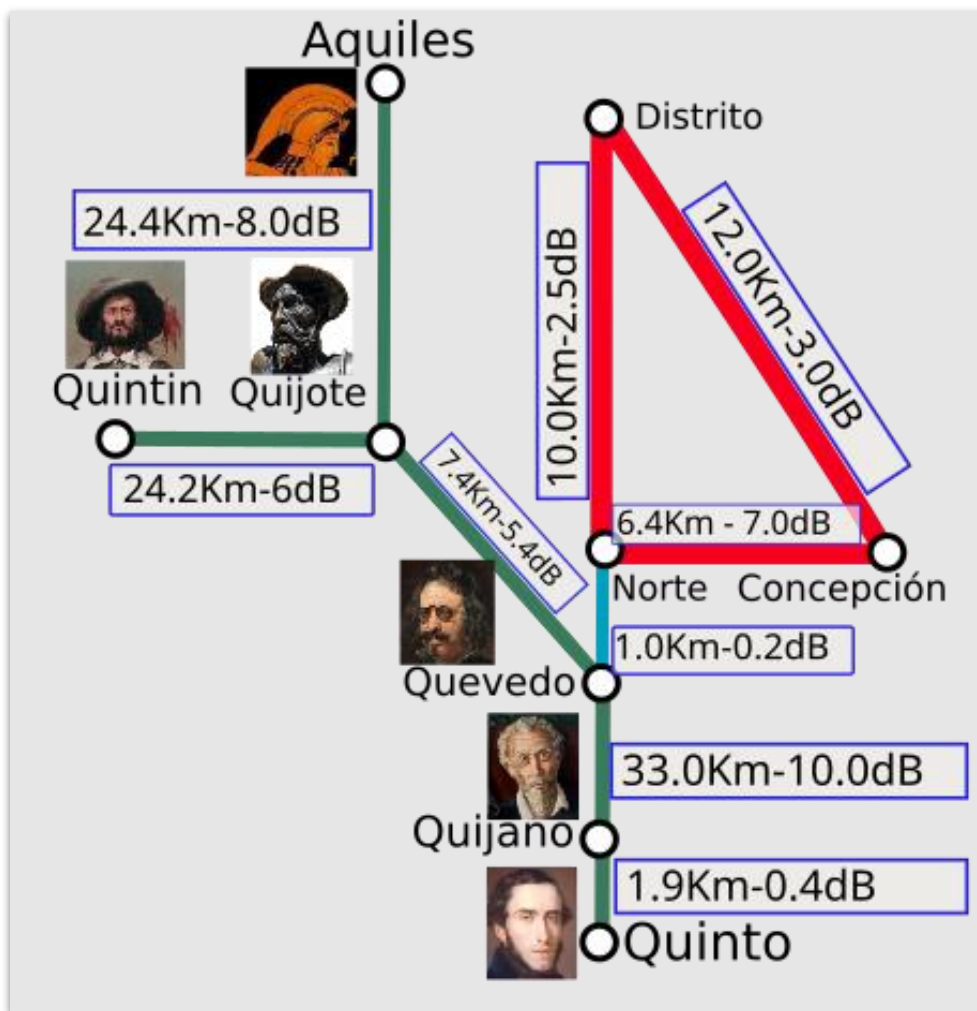
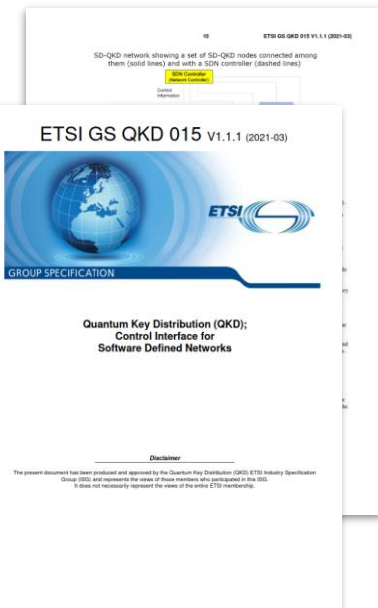


**ATENCIÓN**



# La red cuántica de Madrid

Red experimental de **comunicaciones cuánticas** como QKD.



**Comunidad de Madrid**  
Ref. del prog.: P2018/TCS4342  
Acrónimo: QUITEMAD-CM

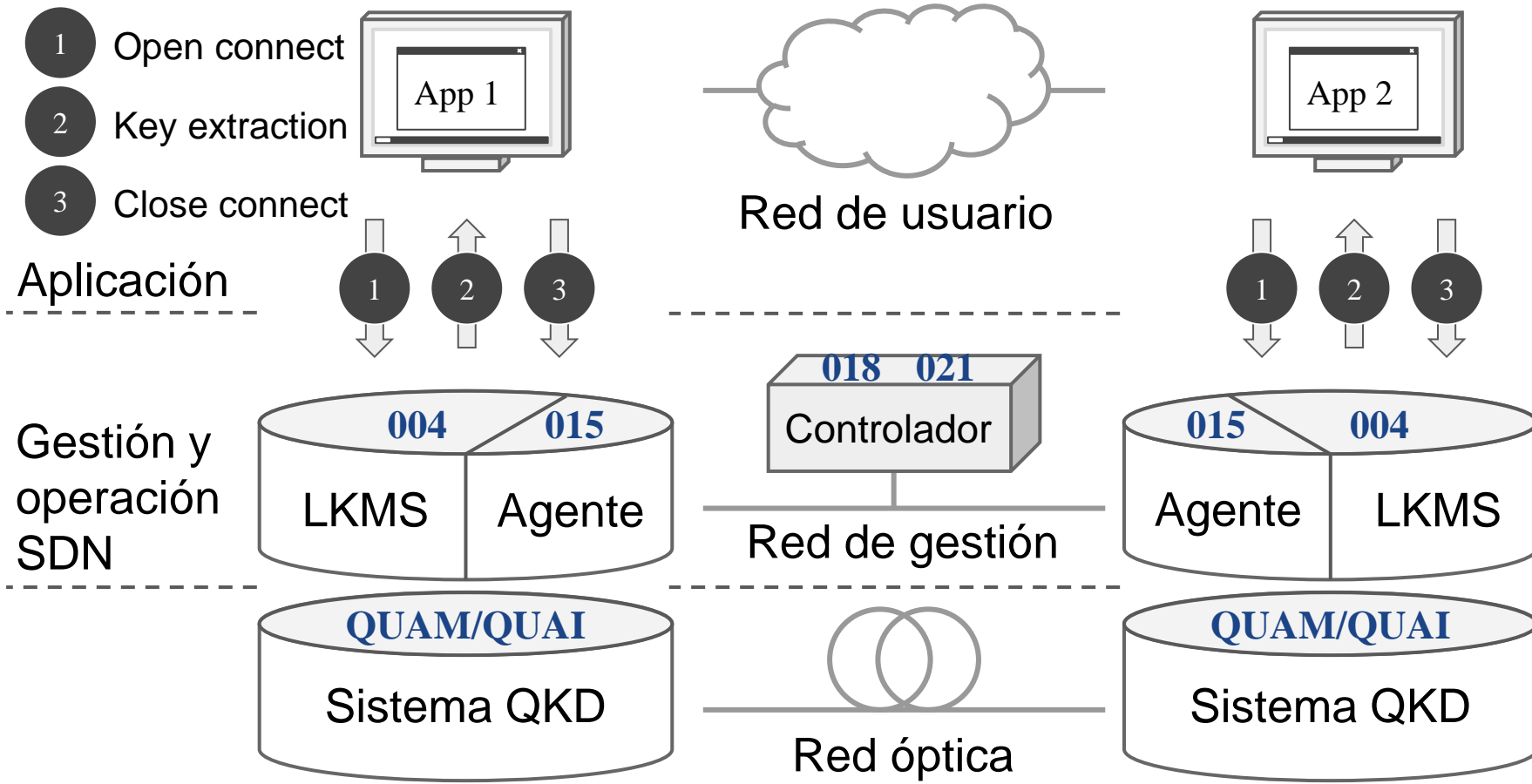
UNIÓN EUROPEA  
Fondos Estructurales  
*Invertimos en su futuro*





# La red cuántica de Madrid

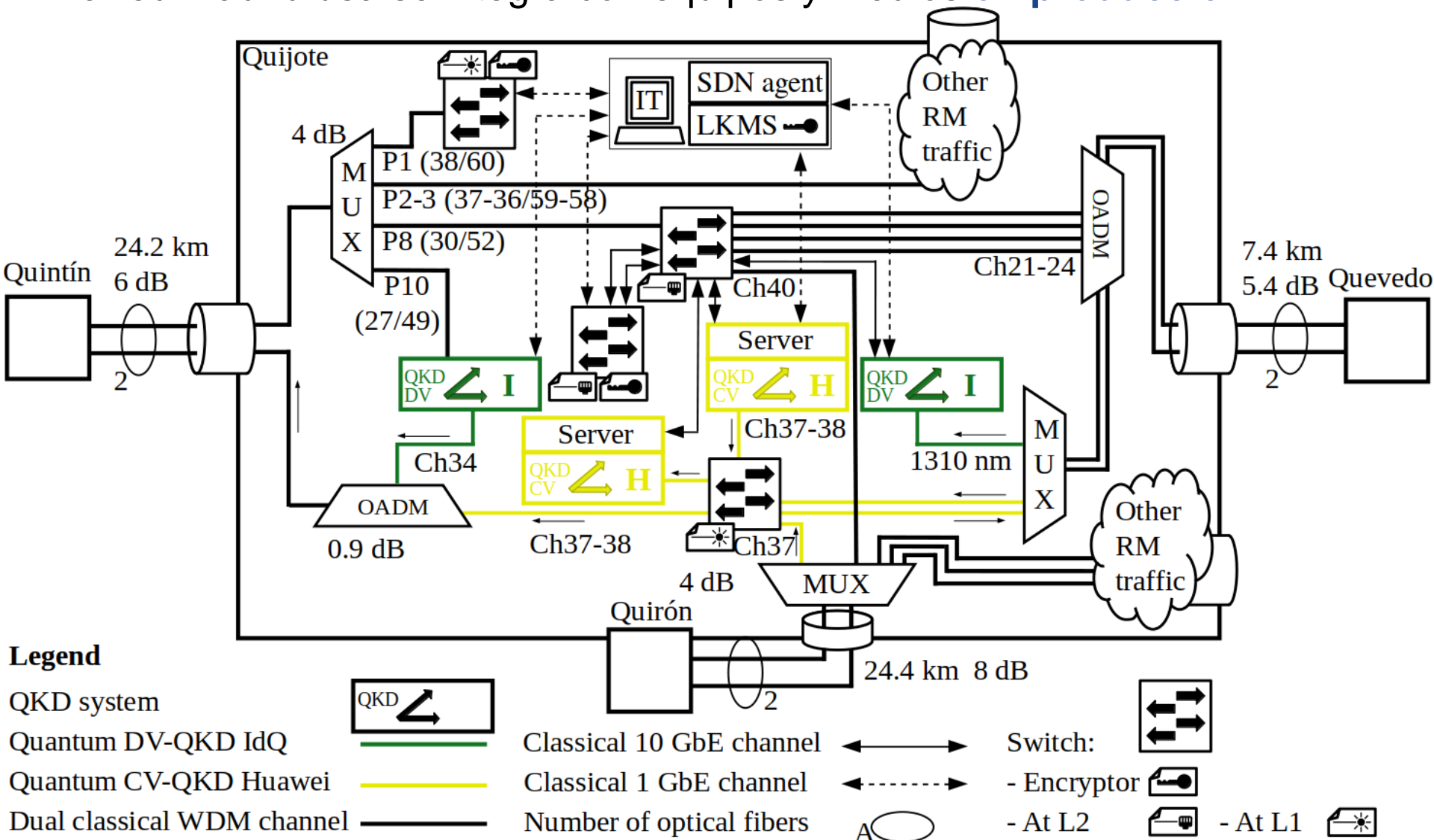
La red **SDN** de Madrid usa interfaces normalizadas del ETSI IGS QKD.



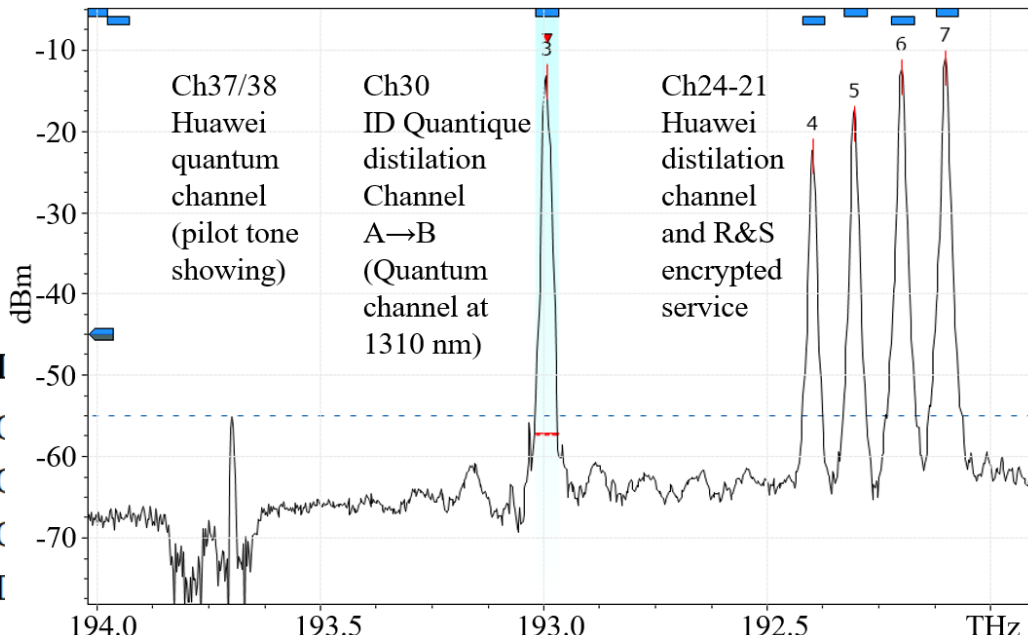
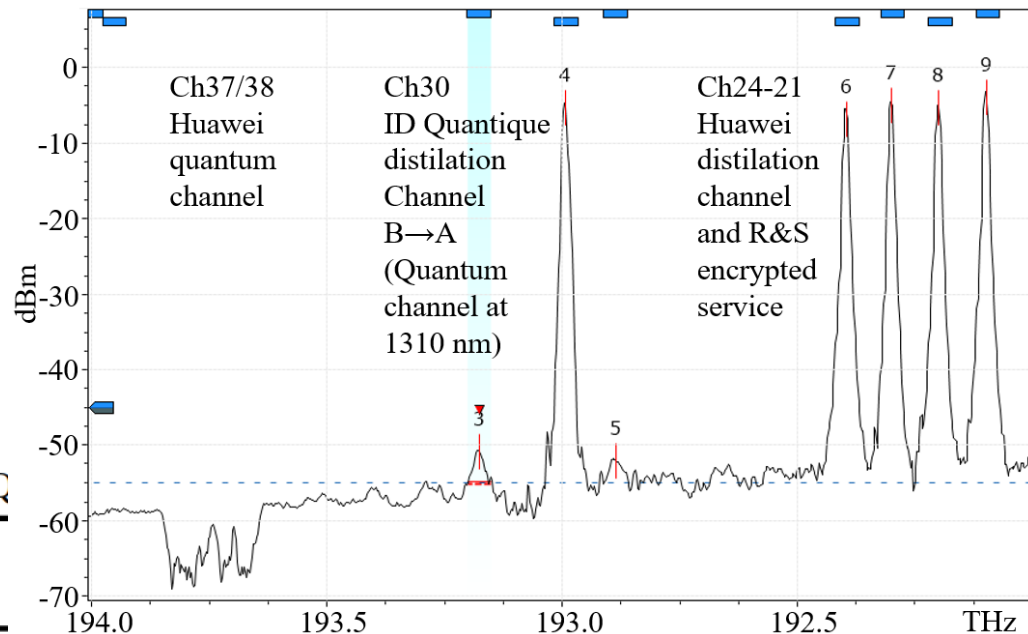
Infraestructura cuántica

# Criptografía cuántica

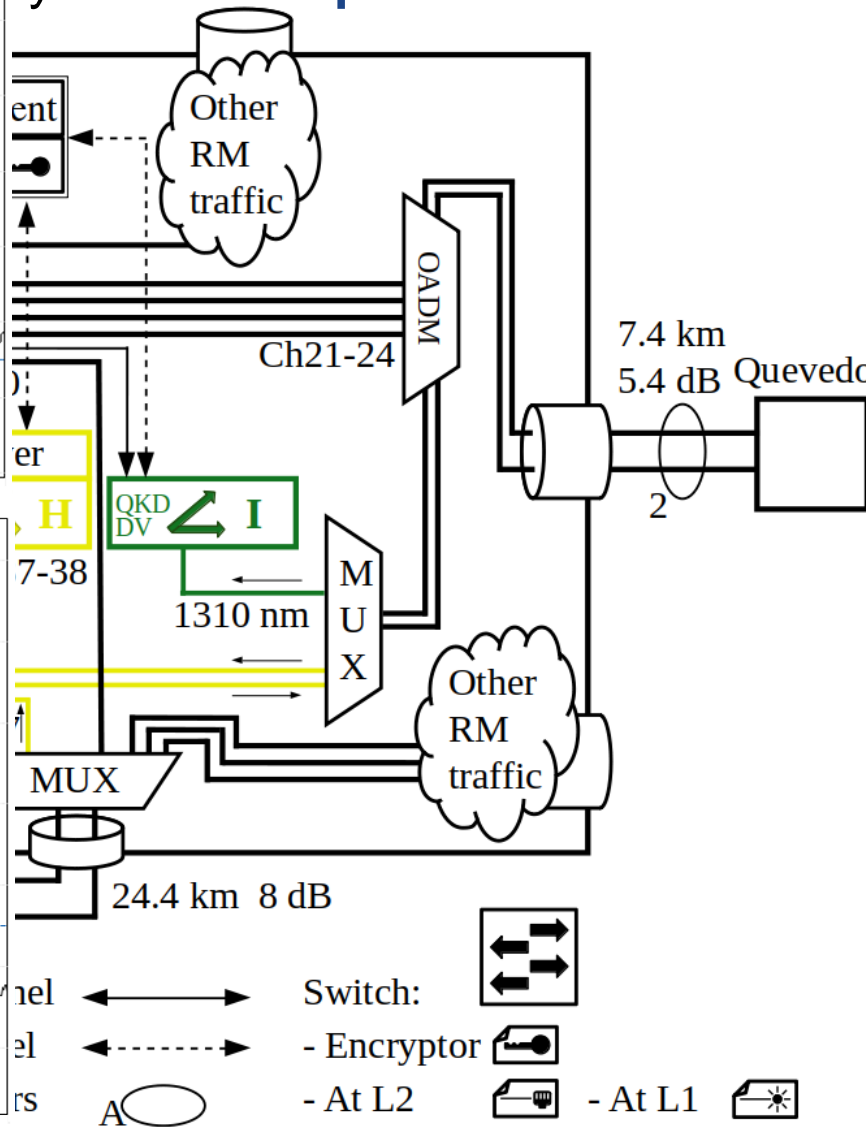
La red Madrid usa se integra con equipos y medios **en producción**.



# Criptografía cuántica

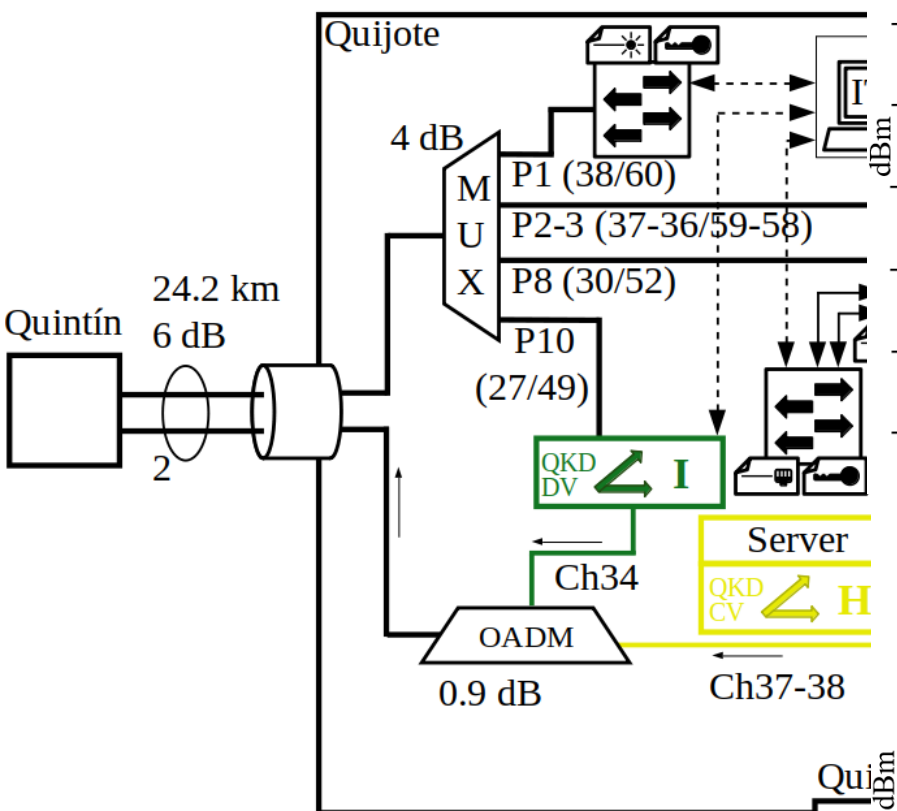


y medios en producción.



# Criptografía cuántica

La red Madrid usa se integra con



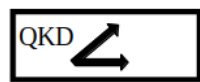
## Legend

QKD system

Quantum DV-QKD IdQ

Quantum CV-QKD Huawei

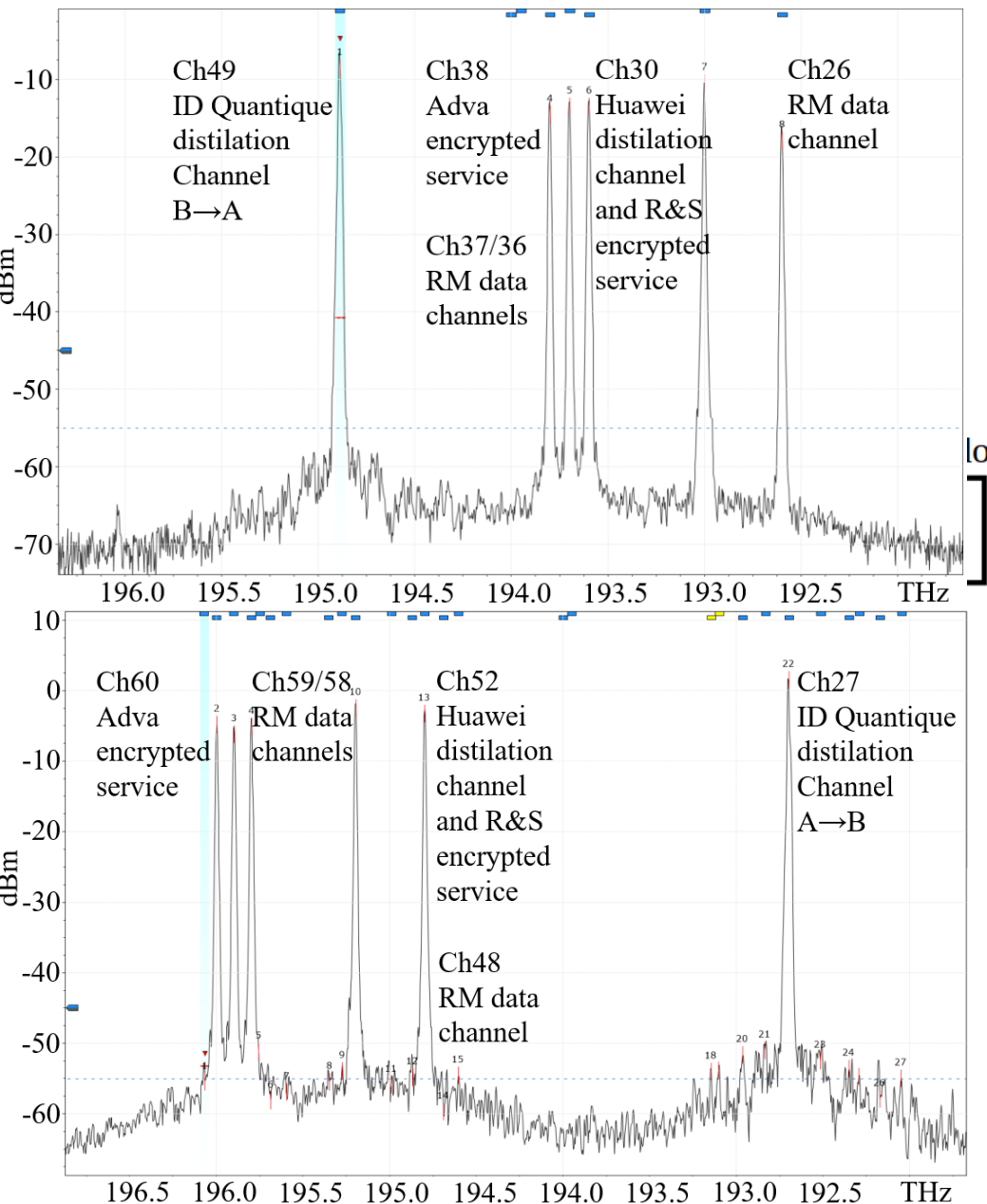
Dual classical WDM channel



Classical 1

Classical 1

Number of

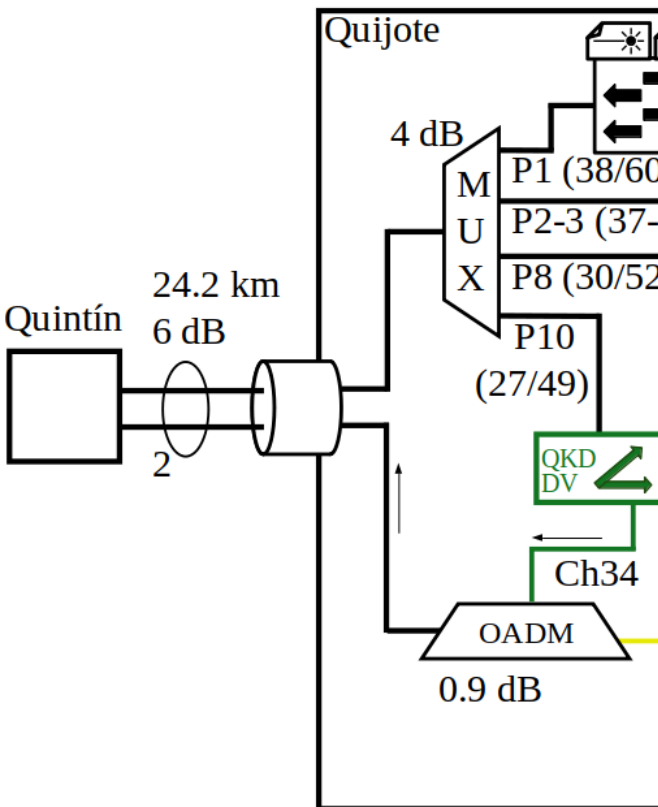


# Criptografía cuántica



La red Madrid usa se interconecta

los en producción.



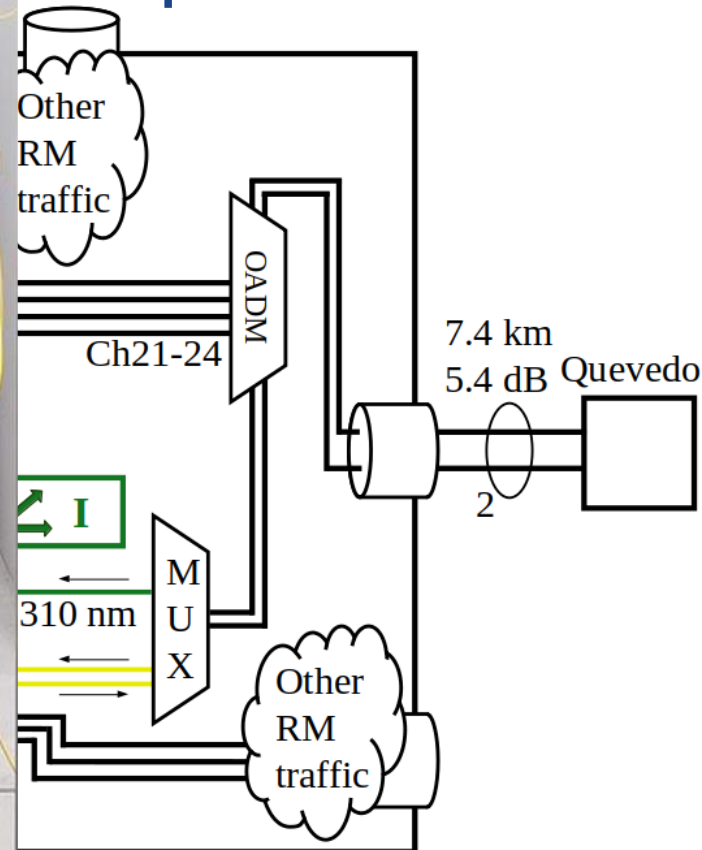
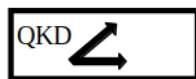
## Legend

QKD system

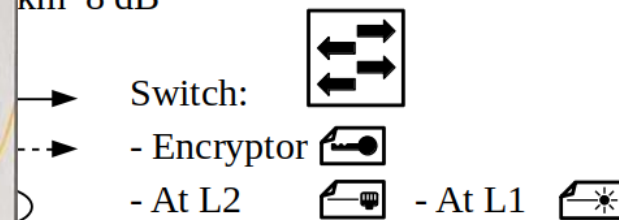
Quantum DV-QKD IdQ

Quantum CV-QKD Huawei

Dual classical WDM channel



km 8 dB

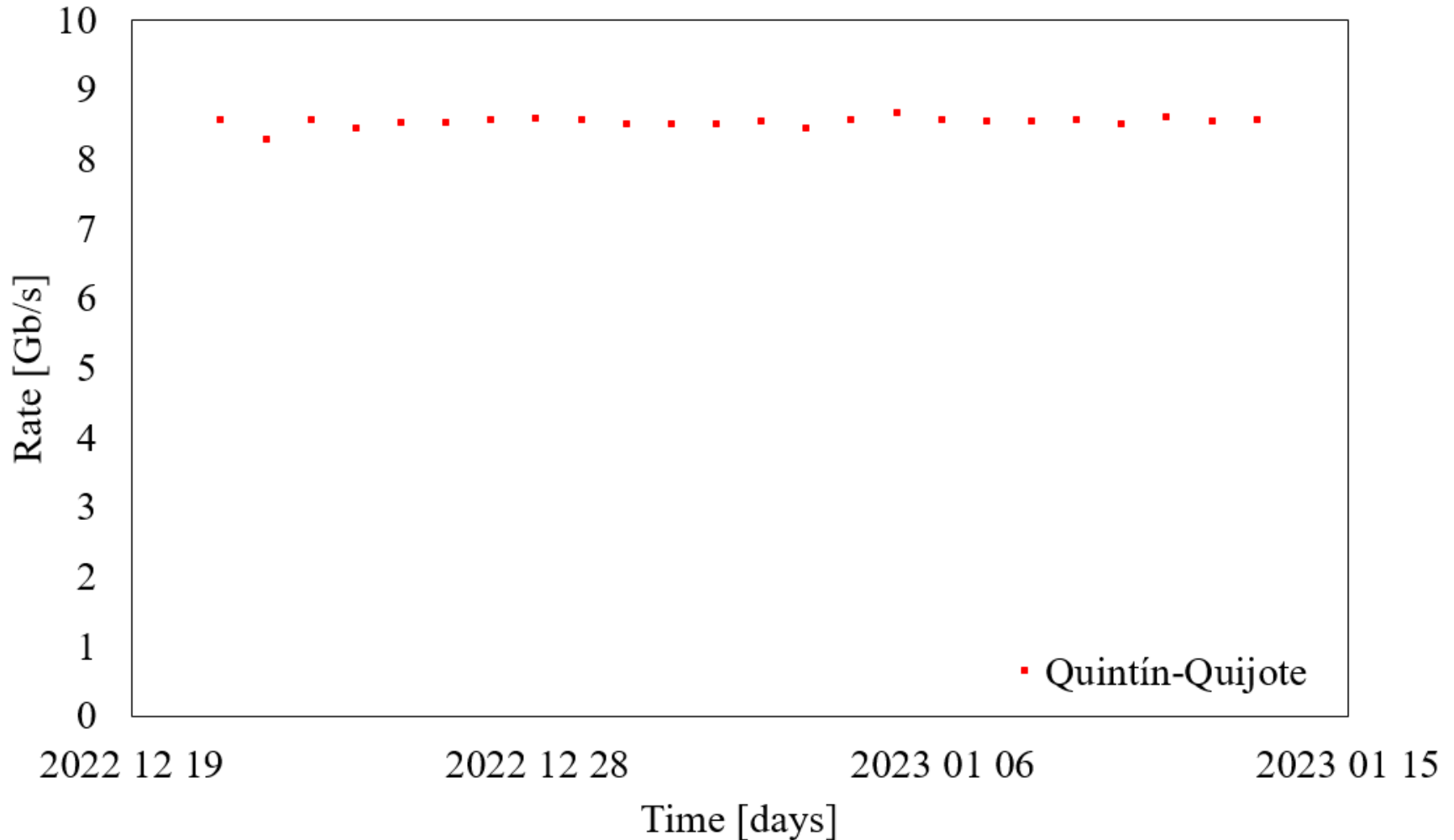


# Criptografía cuántica



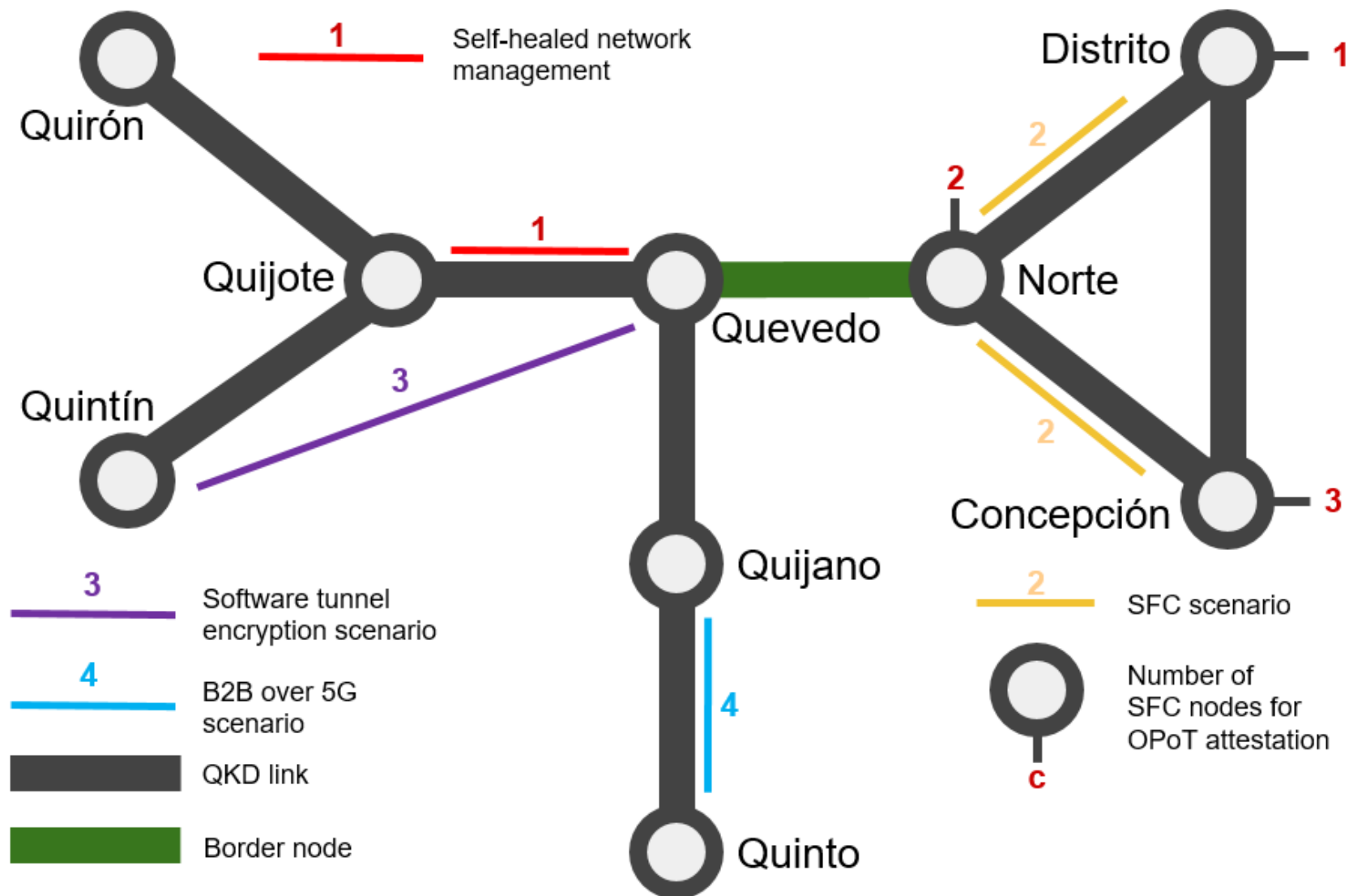
Se ensayan **aplicaciones criptográficas** realistas e industriales.

Quintín-Quijote encrypted service. Rate vs. time.

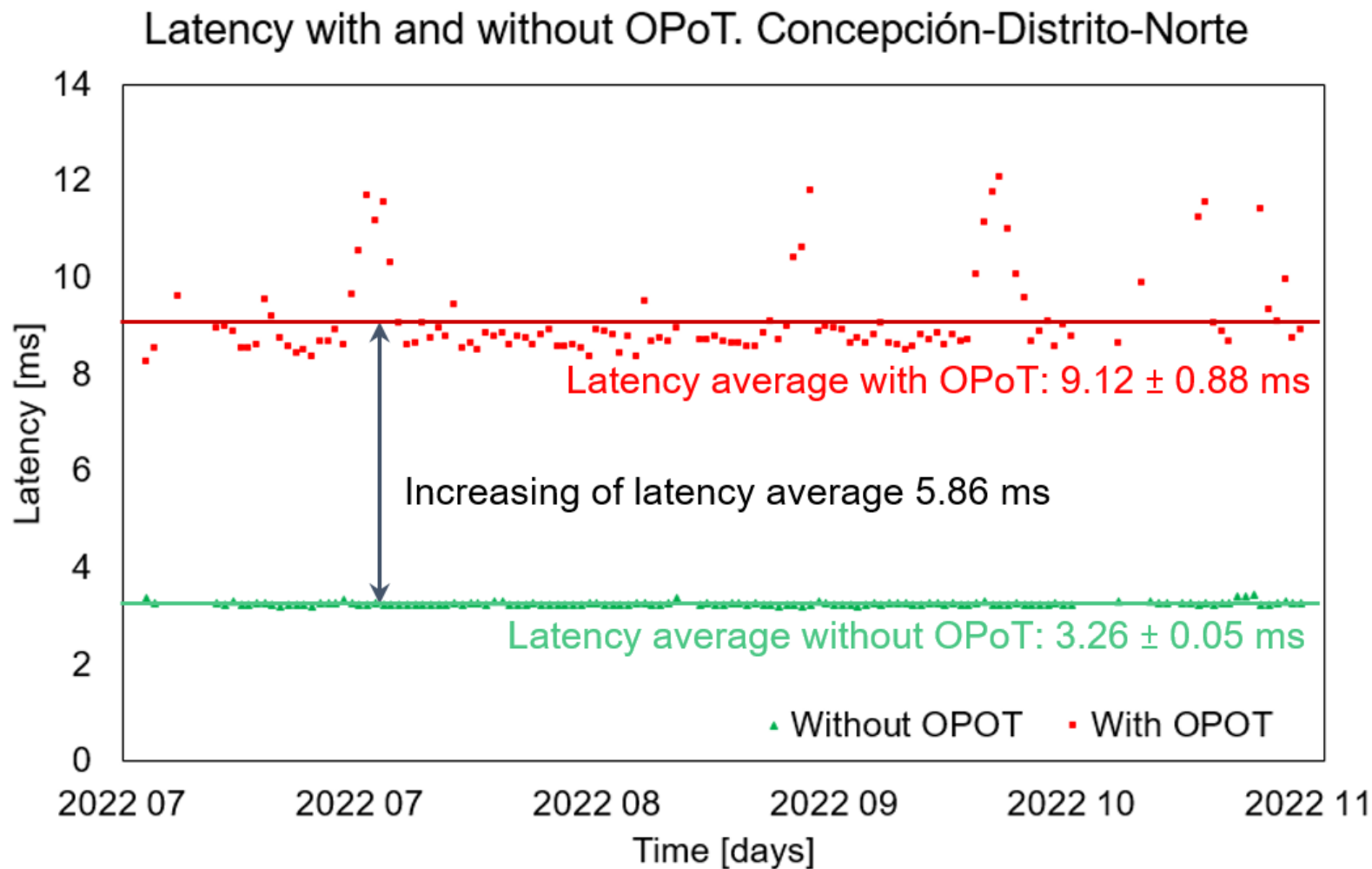


# Criptografía cuántica

Se ensayan **aplicaciones criptográficas** realistas e industriales.



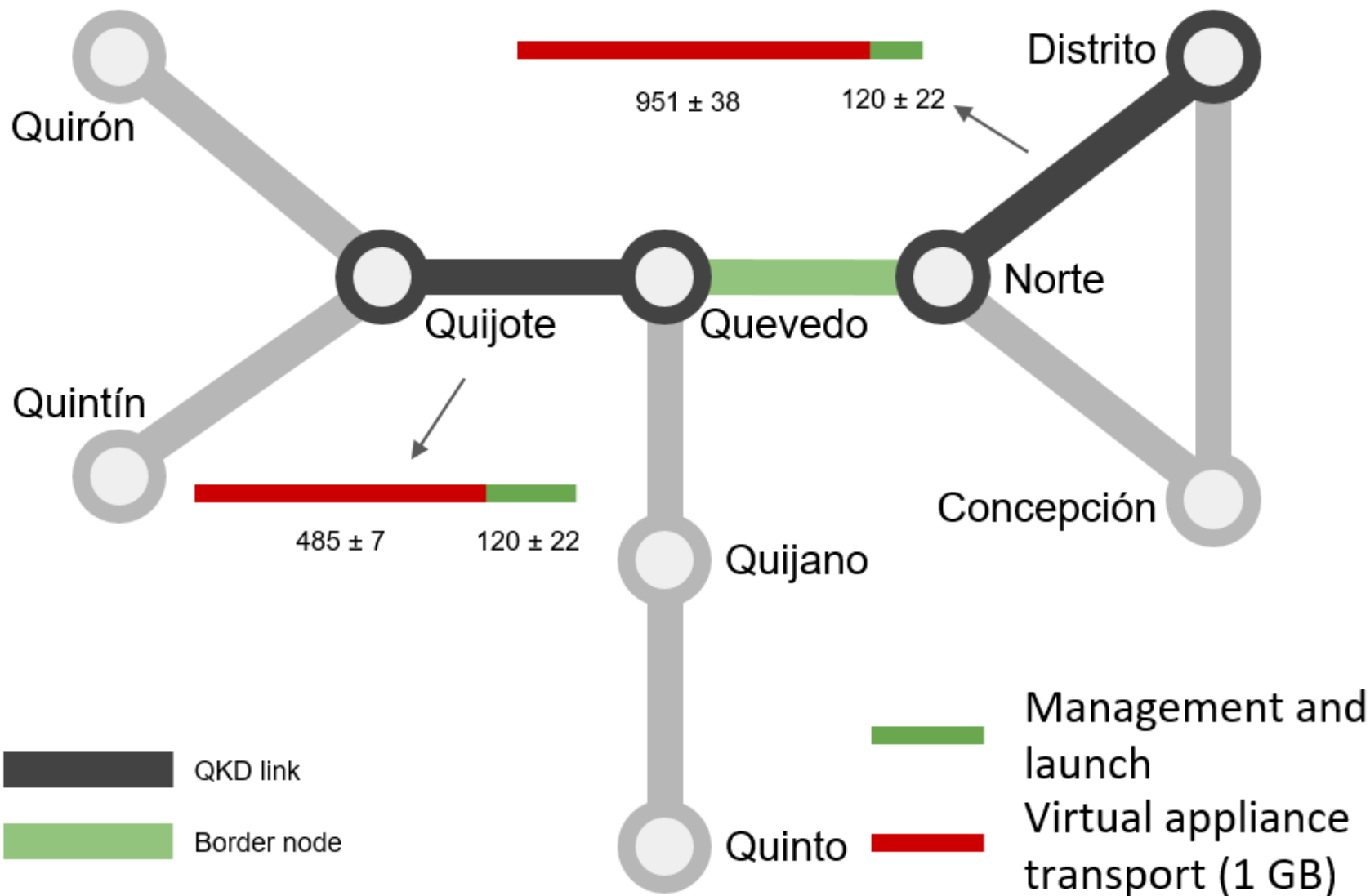
Se ensayan **aplicaciones criptográficas** realistas e industriales.





# Criptografía cuántica

Se ensayan **aplicaciones criptográficas** realistas e industriales.



# La red cuántica de Madrid



## MadQCI

DESDE 2008



## EuroQCI

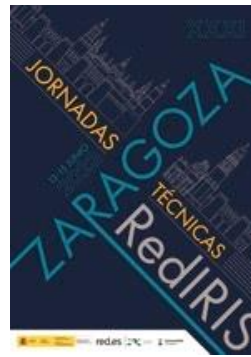
DECLARATION ON A  
QUANTUM COMMUNICATION  
INFRASTRUCTURE  
FOR THE EU

All 27 EU Member States



@FutureTechEU #EuroQCI





POLITÉCNICA

# MadQCI: una red cuántica metropolitana en Madrid

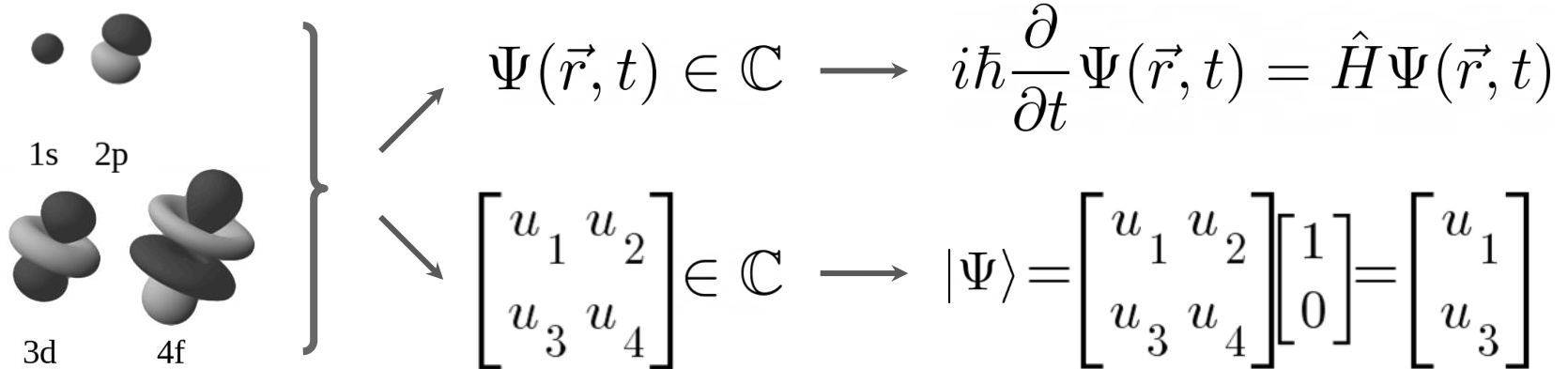
JJTT RedIris 2023. Tecnologías emergentes

Universidad Politécnica de Madrid  
Centro de Simulación Computacional  
Grupo de Investigación en Información y  
Computación Cuántica

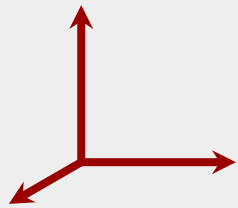
Alberto Sebastián-Lombraña, Laura Ortiz, Juan P. Brito, Rubén B. Méndez, Rafael García, Jaime S. Buruaga, Rafael Artiñano, Daniel Gómez Aguado, Marta Cid, José Luis Bejarano, Vicente Martín.

# Cuántica e información

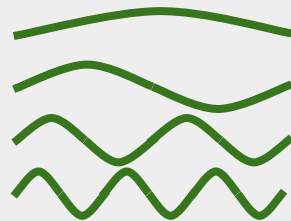
Quantum mechanics is an **abstract model** that describes possible states of reality with vectors of a **Hilbert space**



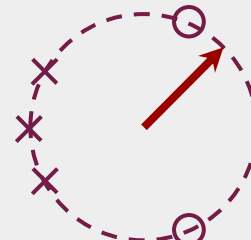
## Some examples of Hilbert spaces...



Euclidean  $\mathbb{R}^3$   
- Kinematics



Lebesgue  $L^2$   
- Wavefunctions



Phasors  $\mathbb{C}^2$   
- Linear systems

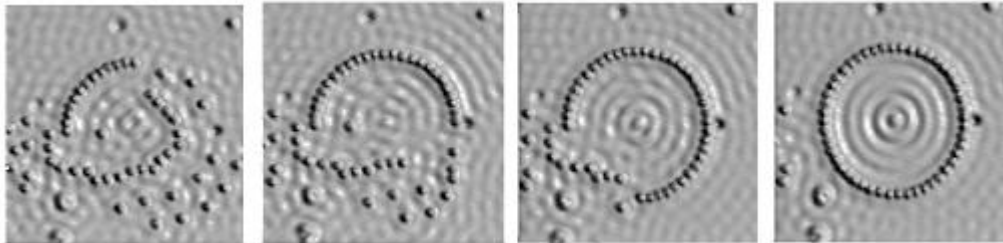
## and some key topics

- Vectors
- Distance
- Basis
- Projection
- Completeness
- **Linearity**

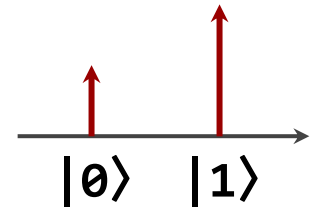
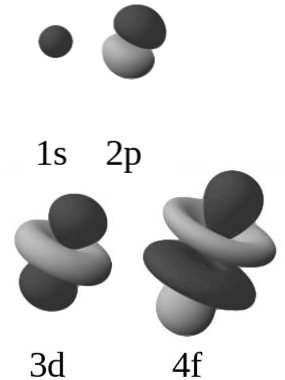
# Cuántica e información

In the early years of the 20th century some observed **microscopic phenomena** included:

- That physical restraints discretized the set of possible quantities;
  - *e. g.* **boundary conditions** fix certain energy levels.



- That state's time evolution could be described as deterministic but
  - information acquisition results in **uncertain experiments**.
- That exist some quantity **conservation laws** such as energy:
  - *i. e.* no-cloning theorem or no-deleting theorem.



These observations resulted in an **abstract model** called quantum mechanics.

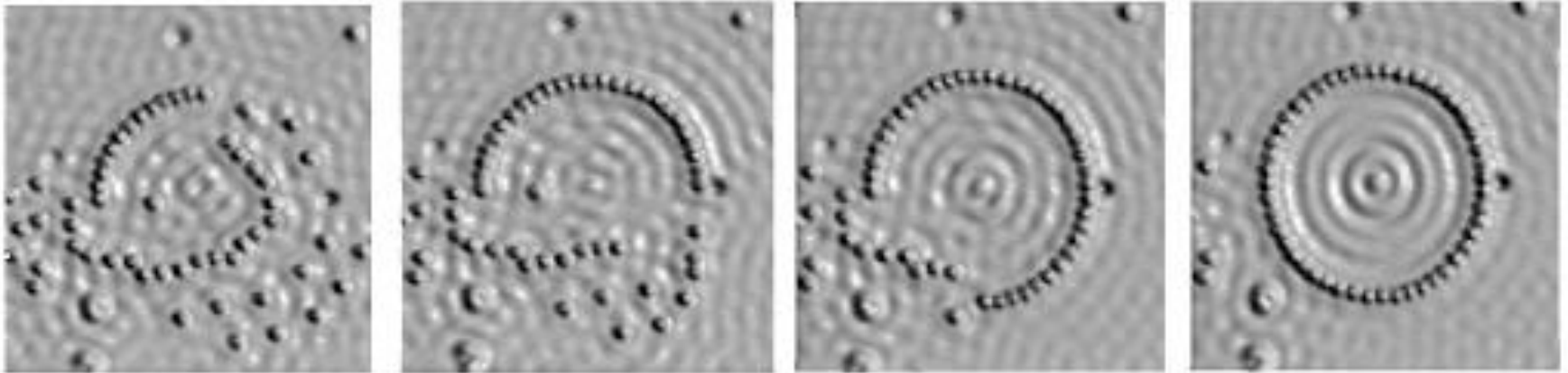
IBM's Making of a Circular Quantum Corral

Image originally created by IBM Corporation. Reproduced in accordance with IBM Copyright  
Permission number 30872, source: <https://www.flickr.com/photos/21746695@N03/2104347312/>

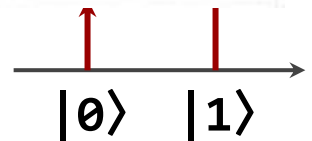
# Cuántica e información

In the early years of the 20th century some observed **microscopic phenomena** included:

- That physical restraints discretized the set of possible quantities;
  - *e. g.* **boundary conditions** fix certain energy levels.



- That exist some quantity **conservation laws** such as energy:
  - *i. e.* no-cloning theorem or no-deleting theorem.



These observations resulted in an **abstract model** called quantum mechanics.

IBM's Making of a Circular Quantum Corral

Image originally created by IBM Corporation. Reproduced in accordance with IBM Copyright

Permission number 30872, source: <https://www.flickr.com/photos/21746695@N03/2104347312/>

# Cuántica e información

Phenomena	Classical paradigm	Quantum paradigm	Possible advantage / disadvantage
Nature	General: $\mathbb{N}, \mathbb{R}$ Specific: $\mathbb{C}$	$\mathbb{C}, \text{QM}$	Extra features e. g. entanglement Not known easy programming
Representation	Bits / trits / ... Bauds	Qubits / ... / qudits Bauds	
Reading	Deterministic	Stochastic / noisy	Difficult error correction
Evolution	Verifiable	Unverifiable	Difficult error correction
Copying (cloning)	Possible	Impossible	Difficult error correction Secure key distribution
Deleting	Possible	Impossible	Theoretical energy saving
Hiding	Possible	Impossible	Difficult error correction Secure blind computing

# Recursos cuánticos

In quantum information theory identifies resources in quantum mechanics either

- to **produce** or to **consume** them.

Information is physical

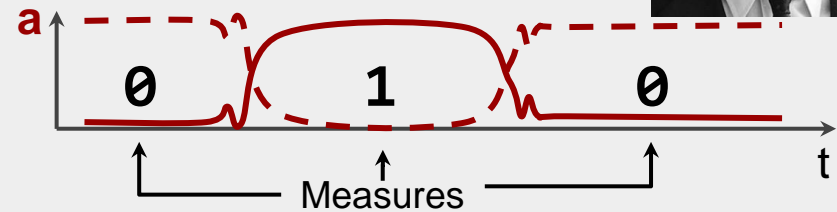
Rolf Landauer



## Bit

Classical information obtained when 'tossing' a 'binary' coin

$$a \mathbf{1} + (1 - a) \mathbf{0}$$



## Qubit

Quantum information obtained when 'tossing' a 'binary complex' coin.

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

