

Cómo diseñar una red cuántica y no morir en el intento: compra pública y creación de ecosistema cuántico.



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU

Alberto Sebastián UPM

David Rincón IMDEA Software/REDIMadrid

Jornadas Técnicas de RedIRIS 2025

Toledo, 21 de mayo, 2025

software





Ponentes



Alberto Sebastián
Investigador GIIIC



David Rincón
Chief Engineer REDIMadrid

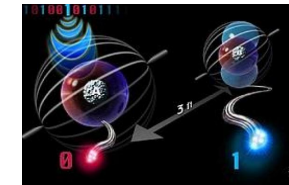




ÍNDICE



1. REDIMadrid
2. Comunicaciones cuánticas
3. Diseño de la red cuántica de Madrid (MadQCI)
4. Ecosistema cuántico





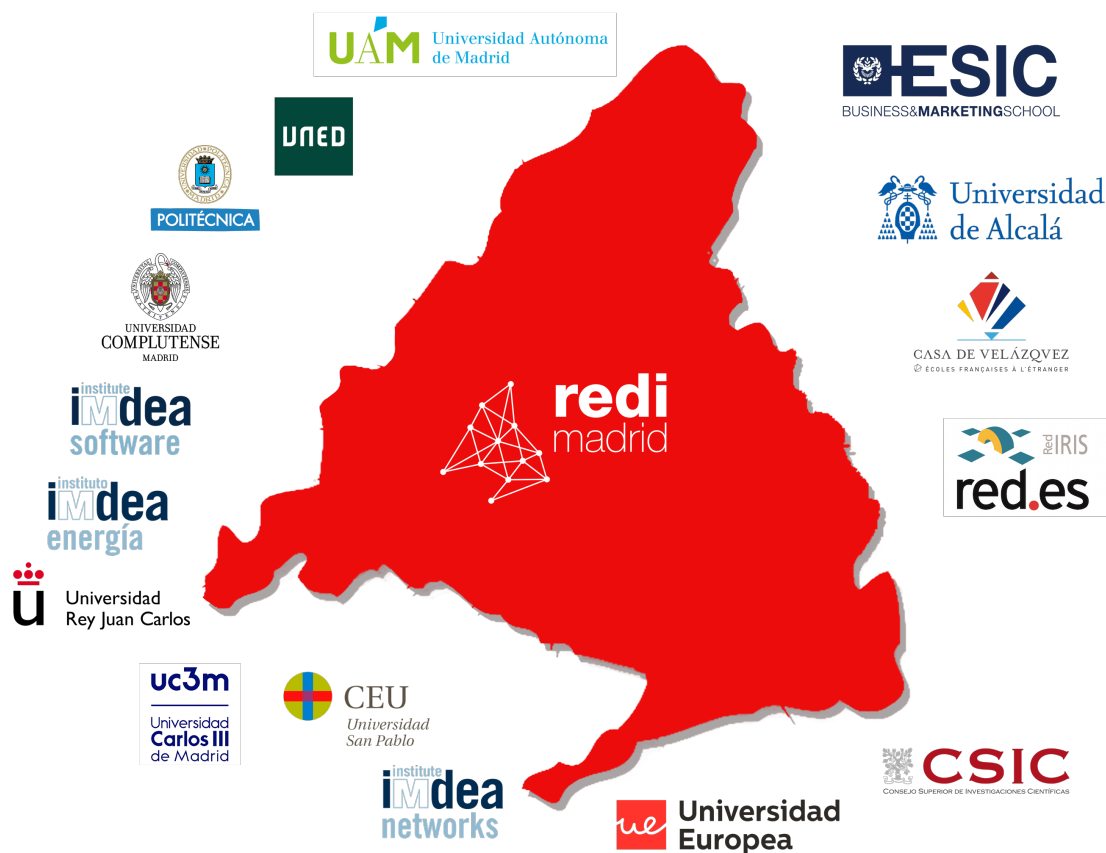
ÍNDICE

1. REDIMadrid





REDIMadrid (la Red de Madrid)



(Financiada por la Comunidad de Madrid)

32 instituciones afiliadas

Fibra oscura REDIMadrid:

Total: $\approx$ 430km:

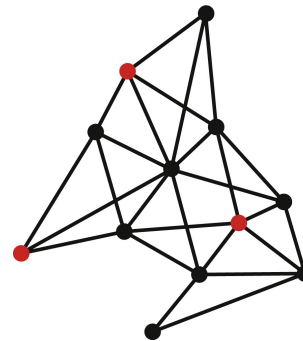


Telefónica

- 150 un par
- 280 dos pares



Correos Telecom



Trafico cursado en REDIMadrid:

Total: $\approx$ 100Gb/s

Todas las universidades con
posibilidad de conexión a **100G**.

Usuarios de REDIMadrid:

Número total de usuarios: 354.737

Número total de mujeres: 179.149(50.51%)

Equipos de comunicaciones:

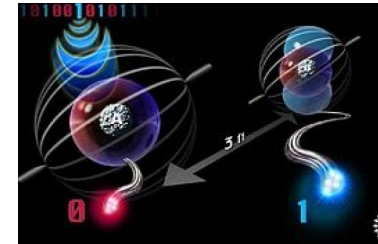
*Número total de Router: 20, de los cuales
2 son P's y 2 son RR.*

Número total de equipos ópticos: 9

JUNIPER
NETWORKS

ciena

2. Comunicaciones cuánticas



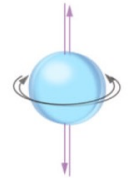
¿Qué son las comunicaciones cuánticas?

Física Clásica
Bits clásico

vs
vs

Física cuántica
Qubits

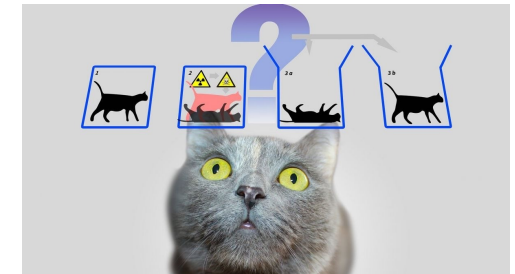
Superposición cuántica



Superposición

$|0\rangle + |1\rangle$

**EL GATO DE
SCHRÖDINGER**

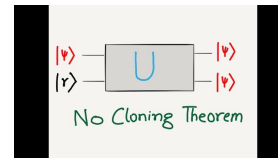


Classical Bit

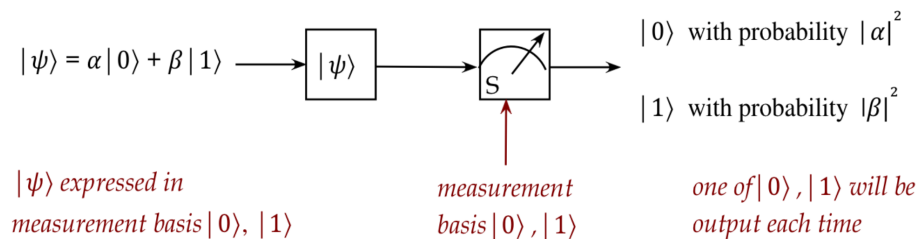


¿Qué son las comunicaciones cuánticas?

2. Teorema de la no-clonación



Este teorema fue introducido por Wootters, Zurek y Dieks en 1982 y consiste en que no se pueden realizar copias de un estado desconocido de un sistema



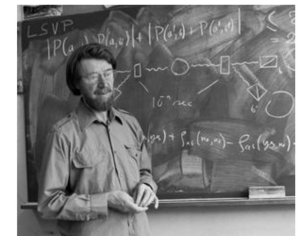
**

Solo con medir el estado del qubit, este se modifica
Problema: No se puede amplificar un fotón cuántico.
Ventaja: No se puede copiar un fotón cuántico.

3. Entrelazamiento cuántico



Permite que dos partículas (fotones) separadas, incluso a kilómetros de distancia, estén conectadas de una forma que la física clásica no puede explicar.



Ventaja: Tenemos la posibilidad de hacer repetidores cuánticos.



ÍNDICE



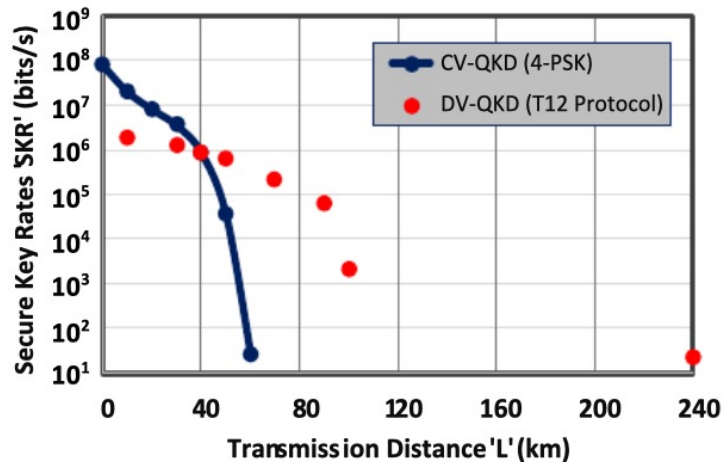
3. Diseño de una red cuántica de Madrid (MadQCI)



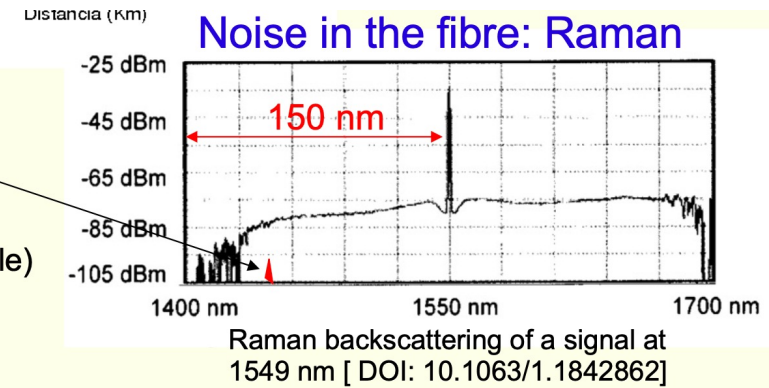
Retos y viabilidad de integrar QKD en infraestructuras de red existentes

0 km	10^9 photons/sec.
15 km	$5 \cdot 10^8$
150 km	10^6
300 km	1000
600 km	1 p per 20 min.
900 km	1 p per 36 years

Losses in fibre 0.2 dB/km



Single Photon
(approx. scale)



Problema: límite de ~30dB, ~150km para transmitir la clave.

Problema: con el aislamiento de los amplificadores entre canales.

Solución: Trusted nodes/ repetidores cuánticos. Satélites para larga distancia.

Nuevos protocolos pueden llegar a ~60dB, ~300km

1) ¿Tienes fibra oscura libre?

a) Construcción de una red QKD dedicada.

- Check: [arXiv:0804.0122](https://arxiv.org/abs/0804.0122)

b) Construir una red QKD dedicada que transmita tanto los canales QKD como los canales clásicos asociados (canal de destilado, sincronismo etc..)

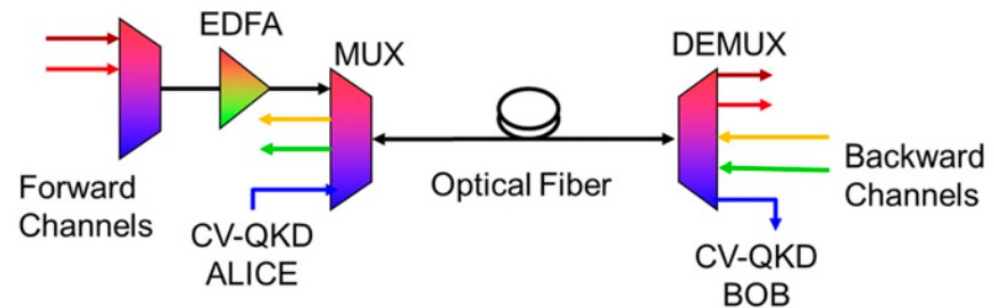
- Check: [arXiv:1309.3923](https://arxiv.org/abs/1309.3923)

2) ¿No Tienes fibra oscura libre? → Fully integrated quantum/clasiscal network.

a) *¿Tienes una red DWDM sin amplificación?* → integrar CV-QKD es relativamente sencillo

b) *¿Tienes una red DWDM con amplificación?* → Integrar CV-QKD es complicado.

- Check: [arXiv:2311.12791](https://arxiv.org/abs/2311.12791)



- En MadQCI se busca habilitar un entorno de pruebas que permita experimentar con todas las tecnologías actuales de comunicaciones cuánticas —como protocolos de variable continua, variable discreta, entrelazamiento, MDI, entre otros—, así como estar preparado para integrar futuras tecnologías que puedan surgir en este campo.
- Para el diseño se ha promovido el concepto “Islas”, para ello en la red se van a crear varias islas:
 - Isla con fibra disponible separa de la red DWDM.
 - Isla FODAM co-propagando la lambda cuántica.
 - Isla RODAM sin booster.
 - Isla RODAM total, isla de operador.
 - Además de banda C, también se podrá poner lambda cuántica co-propagada en banda O y en banda L

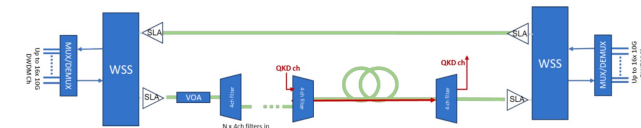


Ilustración 3. Escenario isla 1 (morada)

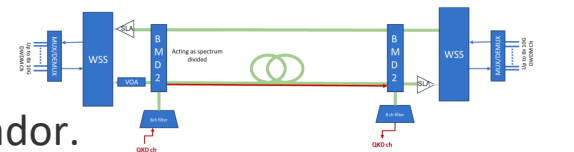


Ilustración 7. Escenario isla 2 (azul)

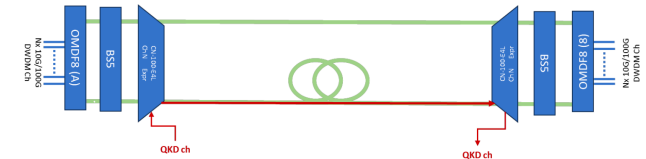
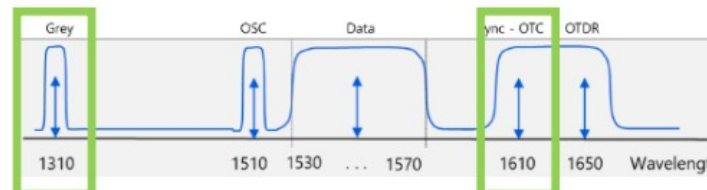


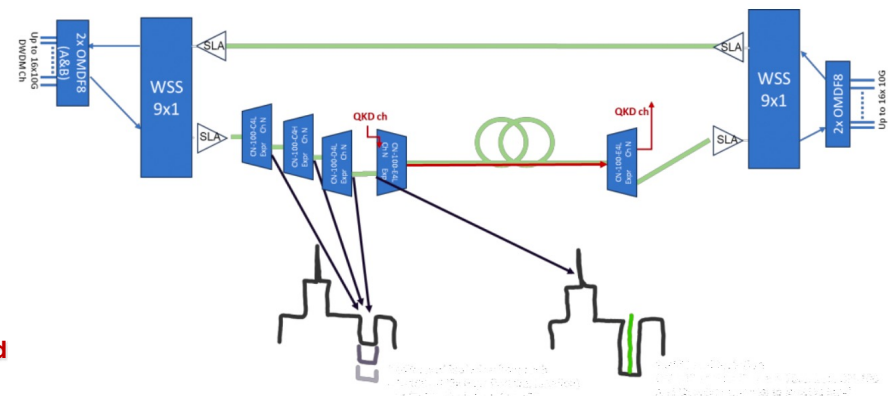
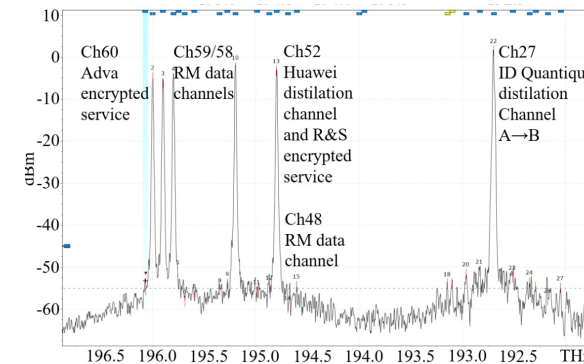
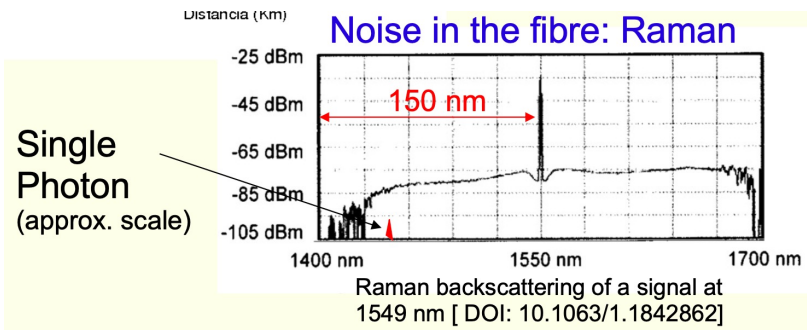
Ilustración 8. Escenario isla 3 (roja)



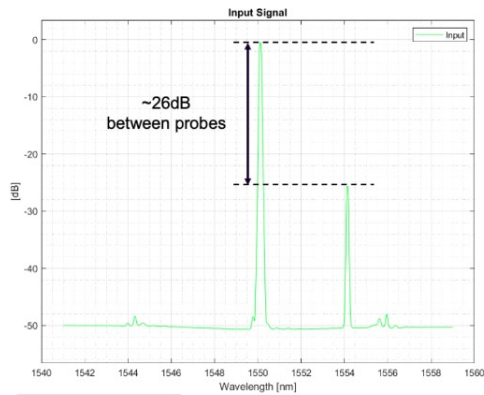
Cómo diseñar una red

ecosistema cuántico.

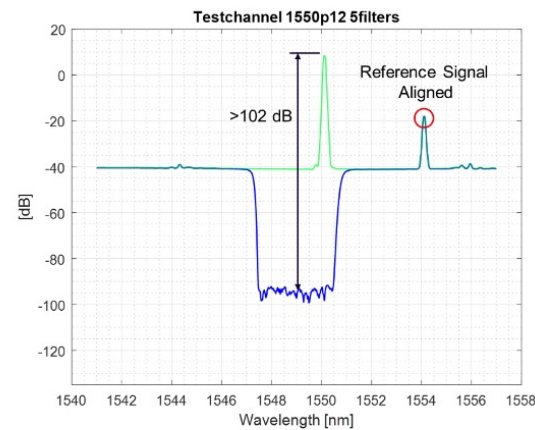
- El principal desafío es el aislamiento generado por la amplificación en una red DWDM. El objetivo de la red cuántica de Madrid es alcanzar un aislamiento cercano a 100 dBm, especialmente en el escenario de una red operadora con booster:



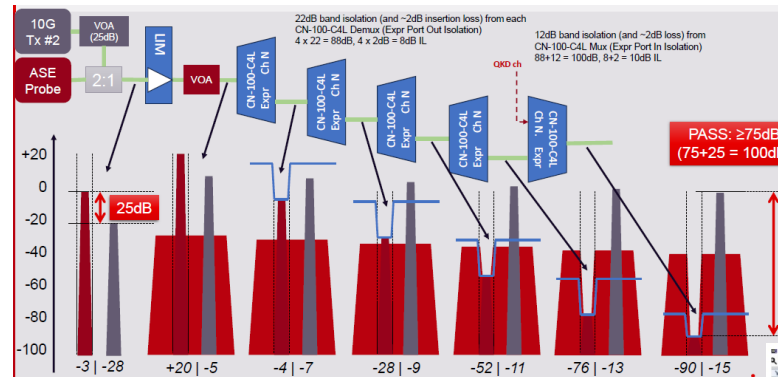
- Aislamiento conseguido en maqueta:



(a) Probe and reference signals at filter cascade input.



(b) Probe signals measured at the output of the 5-filters cascade.



Canal amplificado en el canal 34	Medida después del primer filtro	Medida después del segundo filtro	Medida después del tercer filtro	Medida (teórica) después del cuarto filtro	Medida (teórica) después del quinto filtro
1550.12 nm	RX = -40,98 dBm	RX = -90,78dBm	RX= -107,6dBm	RX= -130dBm	RX= -152dBm

Lecciones aprendidas en el diseño de la red MadQCI

- **Desalineación tecnológica:** Los fabricantes de equipos ópticos tradicionales no están preparados para integrar tecnología cuántica. Sus filtros y amplificadores están optimizados para longitudes de onda clásicas, en línea con su modelo de negocio actual.
- **Resistencia al cambio:** Las soluciones personalizadas (ad-hoc) encuentran una fuerte resistencia por parte de los fabricantes ópticos convencionales.
- **Falta de madurez en el lado cuántico:** Los fabricantes de equipos QKD aún deben avanzar en el desarrollo de sus soluciones, ya que muchas de ellas requieren condiciones poco habituales para su funcionamiento óptimo, tales como:
 - Fibra dedicada
 - Aislamiento por debajo de 100 dBm por el uso de láseres de fotones individuales poco maduros
 - Canales adicionales para sincronización, destilación, etc. Que se envían por la red DWDM en vez de por TCP/IP.
- **Ecosistema inmaduro:** Al no haber habido despliegues industriales previos de QKD, los integradores carecen de experiencia real. El ecosistema está aún en fase temprana.
- **Limitaciones físicas de la fibra actual:** La fibra oscura utilizada por los operadores presenta límites importantes. Se requiere avanzar hacia:
 - Fibras de núcleo hueco
 - Desarrollo de repetidores cuánticos
 - Mejora del alcance de los sistemas QKD actuales



MadQCI en cifras



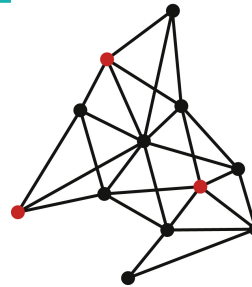
Fibra oscura MadQCI licitada por REDIMadrid:

Total: $\approx$ 440km:



Telefónica

- 390 dos pares
- 50 tres pares



Red QKD mas grande de Europa:

26 emplazamientos en 16 diferentes instituciones, conectadas a MadQCI, todas las universidades públicas de la comunidad de Madrid.

David Rincón

Fibra oscura total de MadQCI:

Total: $\approx$ 690km:

- 490 dos pares
- 200 tres o más pares

Equipamiento:

Router: **12** en total (físicos o virtuales).

Equipos ópticos: **5 + equipos no comerciales**

Equipos QKD: $\approx$ **24**

Encriptadores: $\approx$ **15**; Ipsec, MacSec, Level 1.

Otros equipamientos: $\approx$ **8** sistemas QRNG

KMS y gestores SDN para QKD.



21 de mayo



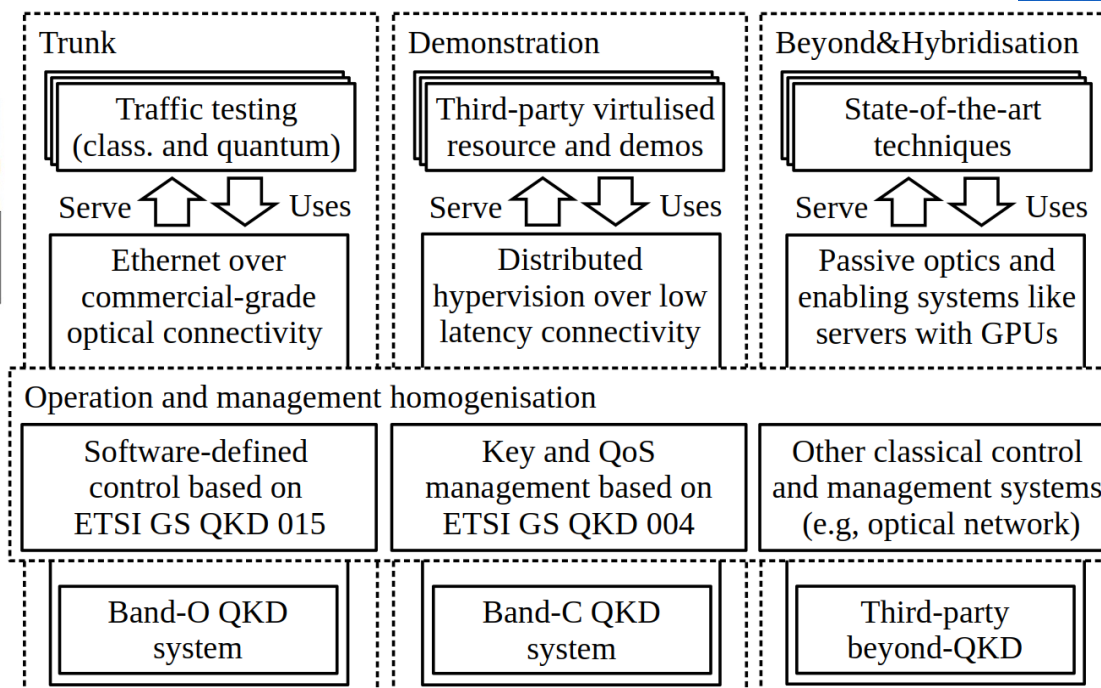
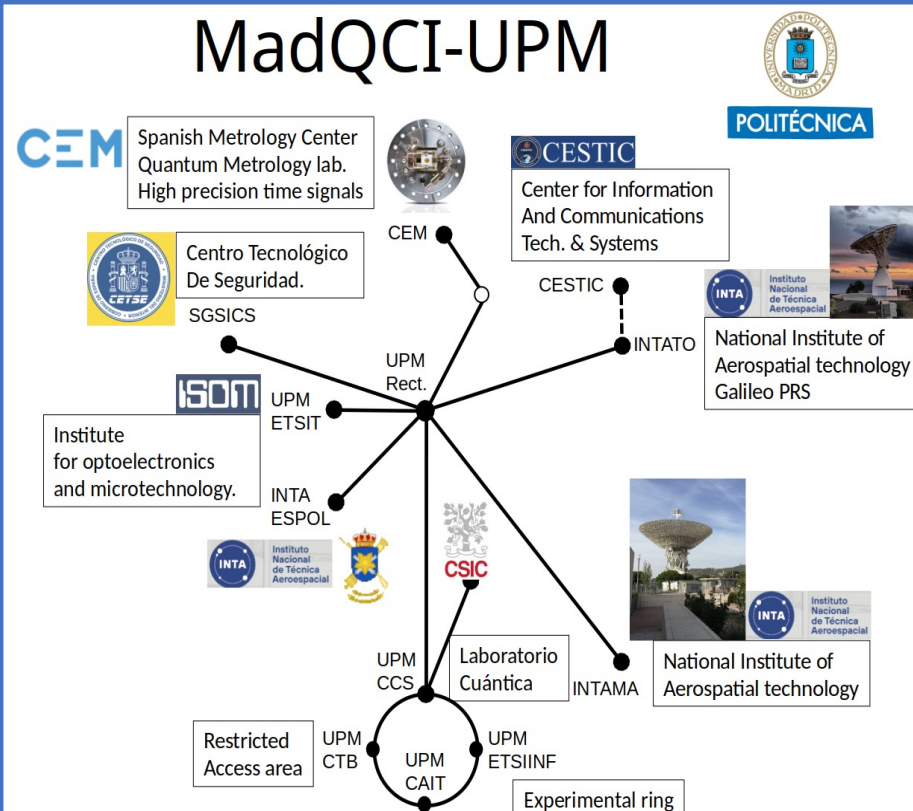
ÍNDICE

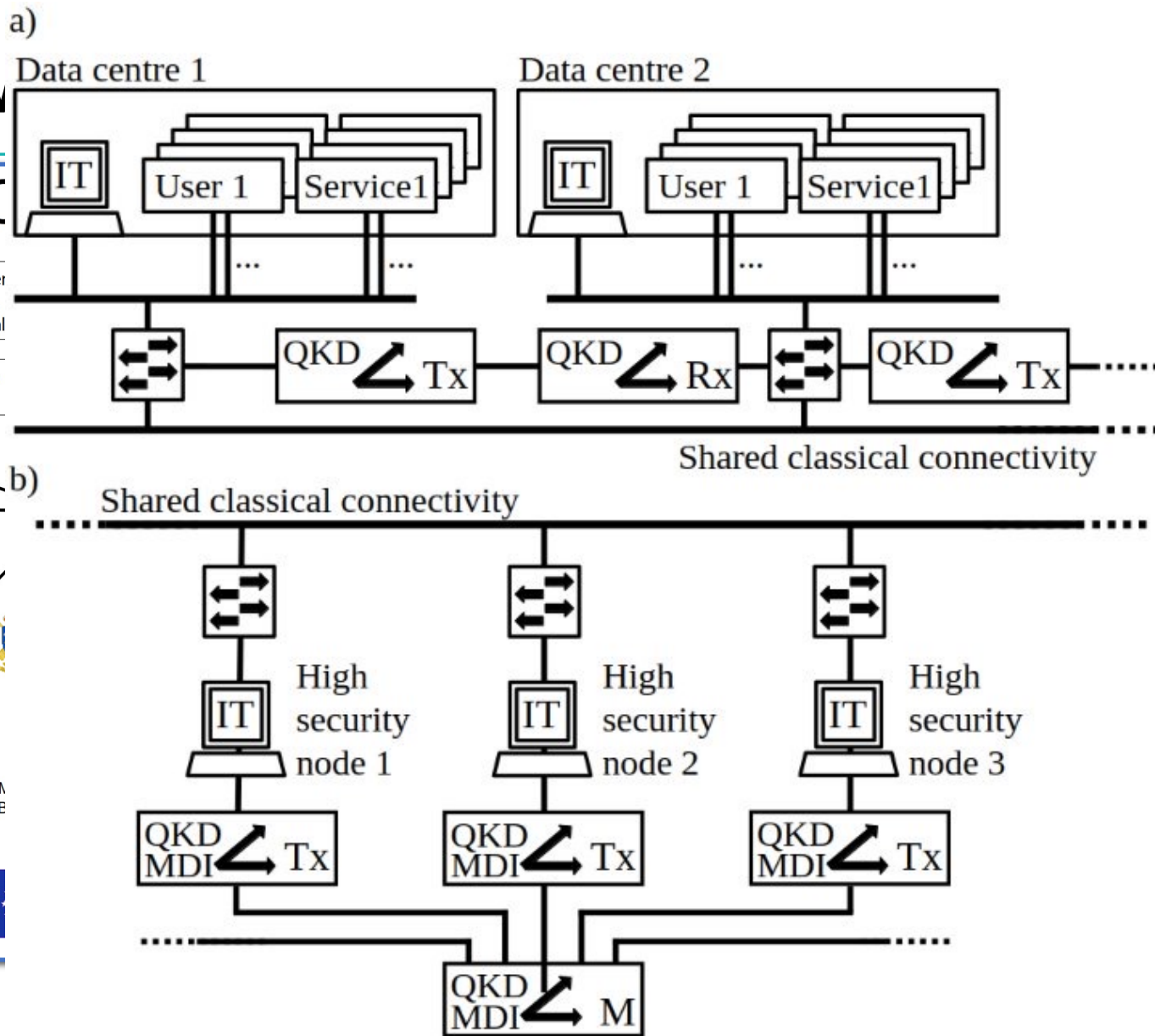


4. Ecosistema cuántico

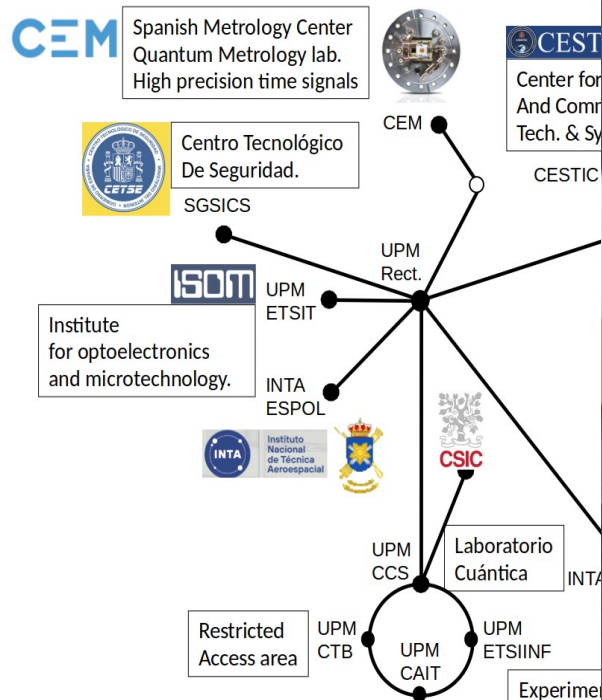


MadQCI-UPM





MadQCI-UPM



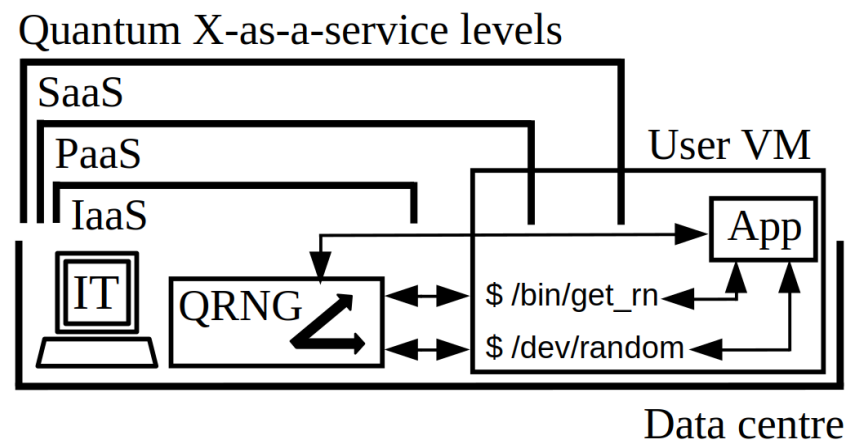
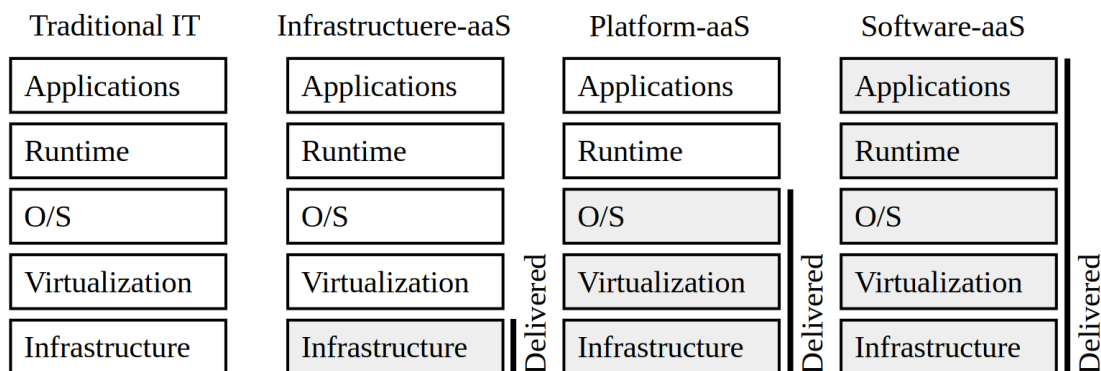
EUROCI SPAIN  Cofinanciada por la Unión Europea

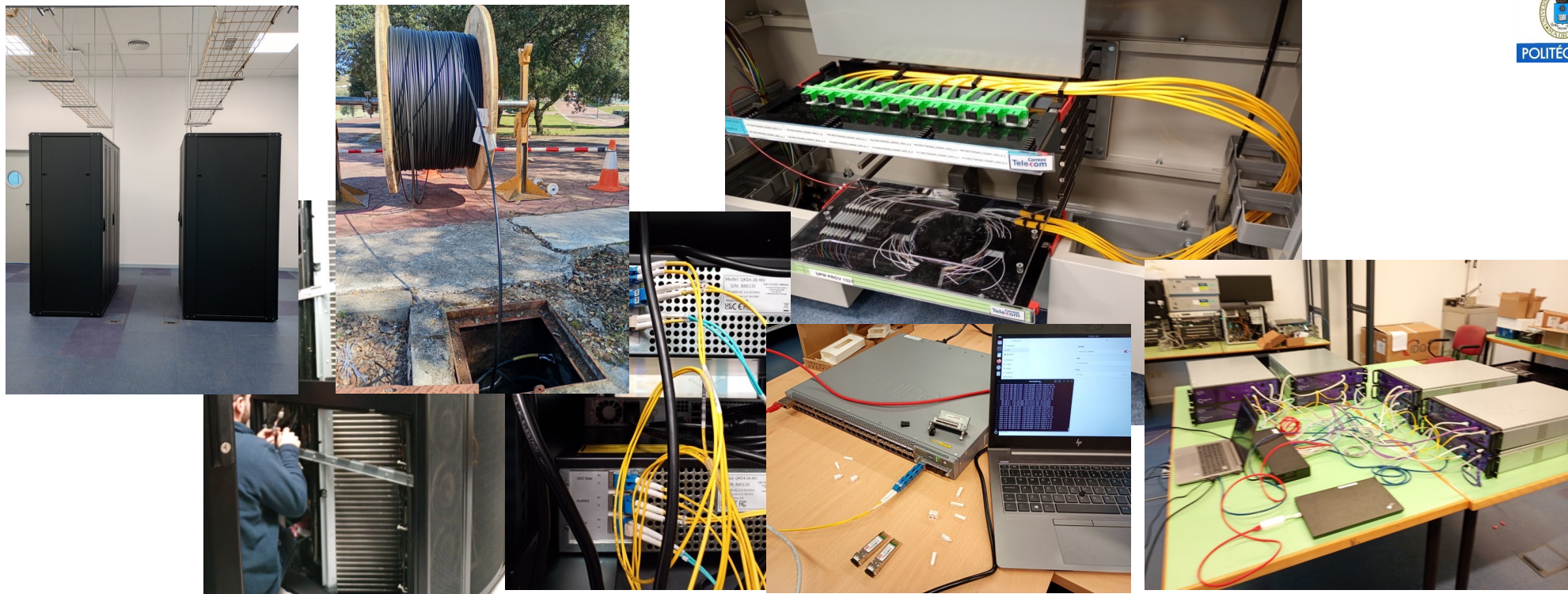
David Rincón

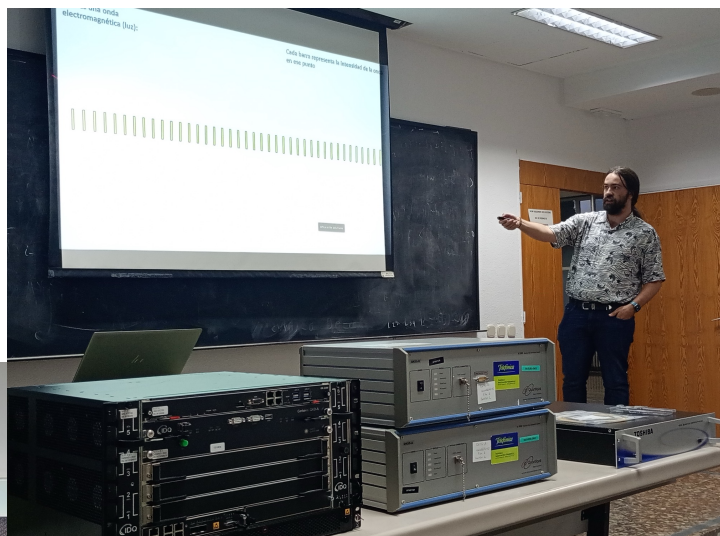


tion erty virtualised and demos Uses istributed on over low connectivity	Beyond&Hybridisation State-of-the-art techniques Serve Uses Passive optics and enabling systems like servers with GPUs
tion and QoS ent based on S QKD 004	Other classical control and management systems (e.g, optical network)
-C QKD stem	Third-party beyond-QKD

his initiative is supported by
under the grant number









thank you!

¿PREGUNTAS?



Plan de Recuperación,
Transformación
y Resiliencia



Financiado por
la Unión Europea
NextGenerationEU

**C. Sanchez¹, V. Martin²,
D. Rincón¹, A. J. Sebastian²,
J. P. Brito², L. Ortiz²**

¹ IMDEA Software/RedIMadrid, 28660 Madrid. Spain

² Center for Computational Simulation and ETSI Informáticos, Universidad Politécnica de Madrid 28660 Madrid, Spain

Alberto Sebastián

aj.sebastian@upm.es

David Rincón

david.rincón@imdea.org

software.imdea.org

software