



# Plataforma y herramientas para adopción y experimentación en computación cuántica

**QUORUM**

# Índice

|                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introducción y contexto</b>                                               | <b>3</b>  |
| 1.1 Contexto tecnológico                                                        | 3         |
| 1.2. Problema de adopción cuántica                                              | 4         |
| 1.3. Relación con roadmap de adopción                                           | 5         |
| <b>2. Arquitectura de la plataforma</b>                                         | <b>6</b>  |
| 2.1 Visión general de la plataforma                                             | 6         |
| 2.2 Flujo de trabajo de la plataforma                                           | 6         |
| 2.3 Integración con hardware cuántico                                           | 7         |
| <b>3. Descubrimiento de casos de uso cuánticos</b>                              | <b>8</b>  |
| 3.1 Contexto y retos en la identificación de casos de uso                       | 8         |
| 3.2 Metodología de descubrimiento de casos de uso                               | 9         |
| 3.3 Fuentes de identificación de casos de uso                                   | 12        |
| 3.4 Tipologías de casos de uso en computación cuántica                          | 13        |
| 3.5 Ficha estructurada de caso de uso                                           | 15        |
| 3.6 Catálogo de casos de uso                                                    | 16        |
| 3.7 Implementación en plataforma digital para el descubrimiento de casos de uso | 18        |
| <b>4. Priorización de casos de uso</b>                                          | <b>23</b> |
| 4.1 Objetivo de la priorización                                                 | 23        |
| 4.2 Marco de evaluación (impacto vs viabilidad)                                 | 23        |
| 4.3 Evaluación del impacto potencial                                            | 24        |
| 4.4 Evaluación de la viabilidad técnica                                         | 25        |
| 4.5 Metodología de scoring                                                      | 27        |
| 4.6 Generación de mapas de oportunidades                                        | 28        |
| 4.6 Generación de mapas de oportunidades                                        | 29        |
| 4.7 Implementación en plataforma digital                                        | 29        |
| <b>5. Ciclos de experimentación y desarrollo de PoCs</b>                        | <b>33</b> |
| 5.1 Objetivo de la experimentación tecnológica                                  | 33        |
| 5.2 Metodología de experimentación                                              | 33        |
| 5.3 Diseño de pruebas de concepto (PoC)                                         | 34        |
| 5.4 Formulación computacional del problema                                      | 34        |
| 5.5 Implementación de algoritmos                                                | 35        |
| 5.6 Ejecución de experimentos                                                   | 36        |
| 5.7 Métricas de evaluación experimental                                         | 36        |
| 5.8 Gestión de experimentos                                                     | 37        |
| 5.9 Iteración y mejora de experimentos                                          | 37        |

|                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.10 Resultados y aprendizaje experimental                                                | 37        |
| 5.11 Fichas estructuradas de pruebas de concepto (PoC)                                    | 38        |
| <b>6. Benchmarking de soluciones cuánticas</b>                                            | <b>39</b> |
| 6.1 Problema del benchmarking en computación cuántica                                     | 39        |
| 6.2 Dimensiones del benchmarking                                                          | 40        |
| 6.3 Benchmarking entre algoritmos cuánticos                                               | 41        |
| 6.4 Benchmarking frente a soluciones clásicas                                             | 42        |
| 6.5 Benchmarking entre hardware cuántico                                                  | 43        |
| 6.6 Benchmarking de impacto y eficiencia                                                  | 44        |
| 6.7 Implementación en plataforma digital                                                  | 45        |
| <b>7. Privacidad en experimentación y colaboración tecnológica</b>                        | <b>50</b> |
| 7.1 Problema de datos en experimentación                                                  | 50        |
| 7.2 Mecanismos de privacidad en entornos de experimentación                               | 51        |
| 7.3 Datos sintéticos                                                                      | 51        |
| 7.4 Metodologías de generación                                                            | 52        |
| 7.5 Aplicación en experimentación cuántica                                                | 54        |
| 7.6 Implementación en plataforma digital                                                  | 55        |
| 7.7 Entornos privados de colaboración (Hubs)                                              | 56        |
| <b>8. Computación cuántica aplicada a machine learning</b>                                | <b>60</b> |
| 8.1 Contexto y motivación                                                                 | 60        |
| 8.2 Algoritmos de quantum machine learning                                                | 60        |
| 8.3 Optimización del entrenamiento de modelos                                             | 61        |
| 8.4 Reducción del coste computacional y consumo energético                                | 62        |
| 8.5 Experimentación en entornos híbridos                                                  | 62        |
| 8.X Implementación en plataforma digital                                                  | 63        |
| <b>9 Gestión de propiedad intelectual y activos de innovación en computación cuántica</b> | <b>64</b> |
| 9.1 Activos generados en experimentación cuántica                                         | 64        |
| 9.2 Documentación estructurada de activos                                                 | 65        |
| 9.3 Gestión de contribuciones en ecosistemas colaborativos                                | 65        |
| 9.4 Potencial de transferencia tecnológica                                                | 66        |
| 9.5 Implementación en la plataforma digital                                               | 66        |

# 1. Introducción y contexto

## 1.1 Contexto tecnológico

La computación cuántica ha emergido en los últimos años como una de las tecnologías con mayor potencial transformador en ámbitos como la optimización, la simulación de sistemas complejos, la ciencia de materiales o el aprendizaje automático.

A diferencia de la computación clásica, basada en bits binarios, la computación cuántica utiliza **qubits**, que permiten representar y manipular estados cuánticos mediante fenómenos como la superposición y el entrelazamiento. Estas propiedades permiten explorar nuevos enfoques algorítmicos para resolver determinados tipos de problemas computacionales.

Durante la última década, el desarrollo de hardware cuántico ha experimentado avances significativos, impulsado por la inversión de grandes empresas tecnológicas, centros de investigación y programas públicos de innovación. Actualmente existen diferentes tecnologías de hardware cuántico en desarrollo, entre las que destacan:

- **Sistemas superconductores.** Qubits implementados mediante circuitos superconductores que operan a temperaturas criogénicas. Es una de las tecnologías más desarrolladas y utilizada por varios proveedores de hardware cuántico.
- **Iones atrapados.** Utilizan átomos ionizados confinados mediante campos electromagnéticos. Destacan por la alta fidelidad de las operaciones cuánticas y tiempos de coherencia relativamente largos.
- **Fotónica cuántica.** Basada en el uso de fotones como portadores de información cuántica. Ofrece potencial para sistemas escalables y para la integración con tecnologías de comunicación cuántica.
- **Quantum annealing.** Enfoque especializado en resolver problemas de optimización mediante la evolución de sistemas cuánticos hacia estados de energía mínima.

Aunque estas plataformas aún presentan limitaciones técnicas – como el ruido en los dispositivos o el número reducido de qubits disponibles –, el ecosistema tecnológico ha comenzado a explorar aplicaciones potenciales en sectores industriales como:

- **Energía.** Optimización de redes eléctricas, planificación de generación y gestión de sistemas energéticos complejos.
- **Logística y transporte.** Optimización de rutas, planificación de flotas y diseño eficiente de redes logísticas.
- **Finanzas.** Optimización de carteras, simulación de riesgos y análisis de instrumentos financieros complejos.
- **Química y materiales.** Simulación molecular y diseño de nuevos materiales mediante modelización cuántica de sistemas químicos.
- **Telecomunicaciones.** Optimización de redes de comunicación y gestión eficiente de recursos en infraestructuras de telecomunicaciones.

Este contexto ha generado un creciente interés por parte de organizaciones públicas y privadas en comprender el potencial de la computación cuántica y explorar sus posibles aplicaciones.

## 1.2. Problema de adopción cuántica

A pesar del creciente interés en la computación cuántica, la adopción de esta tecnología en entornos industriales presenta aún múltiples desafíos.

Uno de los principales retos consiste en **traducir las capacidades tecnológicas emergentes en aplicaciones concretas que generen valor para las organizaciones**. Este proceso implica identificar problemas relevantes que puedan formularse de manera adecuada para su resolución mediante algoritmos cuánticos.

Además, la computación cuántica se caracteriza actualmente por un ecosistema tecnológico complejo, que incluye:

- **Múltiples paradigmas de hardware cuántico.** Coexistencia de distintas tecnologías de computación cuántica (superconductores, iones atrapados, fotónica, annealing), cada una con arquitecturas, capacidades y limitaciones diferentes.
- **Distintos frameworks de desarrollo de algoritmos.** Existencia de diversos entornos de programación y herramientas de desarrollo que requieren conocimientos especializados y presentan diferencias en compatibilidad y funcionalidades.

- **Enfoques híbridos cuántico-clásicos.** Muchos algoritmos actuales combinan computación cuántica con procesamiento clásico, lo que introduce complejidad adicional en el diseño, ejecución y evaluación de experimentos.
- **Algoritmos aún en fase de investigación.** Gran parte de los algoritmos cuánticos se encuentran todavía en fases tempranas de desarrollo, lo que requiere experimentación continua y evaluación de su viabilidad práctica.

Esta diversidad tecnológica hace necesario disponer de herramientas que permitan explorar, evaluar y comparar distintas aproximaciones de forma sistemática.

Por otra parte, la experimentación en computación cuántica suele implicar la colaboración entre diferentes actores del ecosistema – empresas, centros tecnológicos, universidades o startups – lo que introduce retos adicionales relacionados con:

- **Gestión de datos sensibles.** Necesidad de utilizar datasets realistas en experimentación sin comprometer información confidencial o estratégica de las organizaciones.
- **Coordinación de experimentos.** Organización de procesos de experimentación que pueden involucrar distintos algoritmos, datasets, equipos de trabajo y plataformas tecnológicas.
- **Comparación de soluciones tecnológicas.** Evaluación sistemática del rendimiento de diferentes algoritmos, enfoques computacionales o infraestructuras de hardware.
- **Gestión del conocimiento generado durante la experimentación.** Documentación estructurada de casos de uso, experimentos y resultados para facilitar su reutilización y aprendizaje dentro del ecosistema.

En este contexto, la adopción efectiva de la computación cuántica requiere metodologías y herramientas que permitan estructurar el proceso desde la identificación de oportunidades hasta la validación experimental de soluciones.

### 1.3. Relación con roadmap de adopción

El proceso de adopción de computación cuántica en organizaciones suele estructurarse mediante **roadmaps tecnológicos**, que permiten avanzar progresivamente desde fases iniciales de exploración hasta posibles etapas de desarrollo tecnológico más avanzado.

Tal como se ha descrito en el documento de roadmap, este proceso puede dividirse en varias fases principales:

1. **Descubrimiento de casos de uso**, donde se identifican problemas potencialmente abordables mediante computación cuántica.
2. **Priorización de oportunidades**, evaluando el impacto potencial y la viabilidad técnica de los casos de uso identificados.
3. **Experimentación mediante pruebas de concepto**, donde se desarrollan y evalúan algoritmos cuánticos o híbridos.
4. **Escalado y estructuración de programas tecnológicos**, que pueden evolucionar hacia proyectos de innovación más avanzados.

Cada una de estas fases implica la gestión de diferentes elementos, como casos de uso, algoritmos, datasets, experimentos o resultados de benchmarking.

En este contexto, la disponibilidad de plataformas digitales que permitan **estructurar y gestionar estos procesos de forma integrada** resulta especialmente relevante para facilitar la experimentación tecnológica y la colaboración dentro del ecosistema.

La plataforma desarrollada por **QCentroid** se orienta precisamente a proporcionar herramientas que permitan organizar y gestionar las distintas fases del proceso de adopción cuántica descrito en el roadmap.

## 2. Arquitectura de la plataforma

### 2.1 Visión general de la plataforma

La plataforma desarrollada por QCentroid está diseñada para facilitar el desarrollo de proyectos de experimentación en computación cuántica y estructurar los procesos asociados a la exploración tecnológica.

Su arquitectura permite integrar diferentes componentes del proceso de adopción cuántica dentro de un mismo entorno digital, incluyendo:

- descubrimiento y documentación de casos de uso
- priorización de oportunidades tecnológicas
- desarrollo de pruebas de concepto
- benchmarking de soluciones cuánticas y clásicas
- gestión de datasets para experimentación
- coordinación de proyectos dentro de ecosistemas de innovación

Este enfoque permite organizar de forma estructurada los distintos activos generados durante los procesos de experimentación, facilitando la trazabilidad entre casos de uso, algoritmos, experimentos y resultados obtenidos.

Además, la plataforma permite estructurar la colaboración entre diferentes organizaciones mediante entornos de trabajo asociados a proyectos o hubs de innovación.

### 2.2 Flujo de trabajo de la plataforma

El funcionamiento de la plataforma se basa en un flujo de trabajo que refleja las distintas fases del proceso de adopción de computación cuántica.

En términos generales, el flujo de trabajo puede estructurarse en los siguientes pasos:

1. **Identificación de casos de uso**, donde se documentan problemas industriales o científicos susceptibles de explorarse mediante computación cuántica.
2. **Evaluación y priorización**, donde se analizan los casos de uso identificados en función de su impacto potencial y viabilidad tecnológica.

3. **Desarrollo de experimentos**, implementando algoritmos cuánticos o híbridos para evaluar diferentes aproximaciones al problema.
4. **Benchmarking y análisis de resultados**, comparando diferentes algoritmos, configuraciones tecnológicas o plataformas de hardware.
5. **Documentación y gestión de conocimiento**, registrando los resultados obtenidos y estructurando los activos generados durante la experimentación.

Este flujo de trabajo permite organizar de forma sistemática el proceso de experimentación tecnológica y facilita la reutilización del conocimiento generado en proyectos posteriores.

## 2.3 Integración con hardware cuántico

Una característica relevante de la plataforma es su capacidad para integrarse con distintos entornos de ejecución utilizados en computación cuántica.

En el ecosistema actual, los algoritmos cuánticos pueden ejecutarse en diferentes tipos de infraestructuras, como:

- simuladores cuánticos utilizados para experimentación inicial
- hardware cuántico NISQ proporcionado por distintos proveedores tecnológicos
- entornos híbridos cuántico-clásicos que combinan procesamiento clásico y cuántico

La arquitectura de la plataforma permite ejecutar algoritmos en diferentes entornos computacionales y registrar los resultados obtenidos, facilitando su análisis posterior y la comparación entre distintas configuraciones experimentales.

Este enfoque permite realizar procesos de benchmarking entre diferentes algoritmos, configuraciones de hardware y entornos de ejecución, proporcionando información relevante para evaluar el potencial de distintas aproximaciones tecnológicas.

## 3. Descubrimiento de casos de uso cuánticos

### 3.1 Contexto y retos en la identificación de casos de uso

Uno de los principales desafíos en la adopción de computación cuántica por parte de organizaciones públicas y privadas consiste en identificar problemas empresariales concretos que puedan beneficiarse de esta tecnología. A diferencia de otras tecnologías digitales más maduras, la computación cuántica se encuentra aún en una fase de desarrollo temprano, caracterizada por:

- hardware con capacidad limitada
- algoritmos en evolución
- ausencia de estándares industriales consolidados
- incertidumbre sobre los horizontes de aplicabilidad

En este contexto, muchas organizaciones interesadas en explorar el potencial de la computación cuántica se enfrentan a dos dificultades principales:

1. **Identificar problemas adecuados** para ser abordados mediante algoritmos cuánticos.
2. **Evaluar si el esfuerzo de experimentación tecnológica puede generar valor real** en el medio o largo plazo.

Por este motivo, el proceso de descubrimiento de casos de uso requiere una metodología estructurada que permita identificar oportunidades potenciales de forma sistemática, evitando enfoques exploratorios excesivamente abiertos o poco focalizados. El objetivo de esta fase es generar un conjunto estructurado de casos de uso potenciales que puedan posteriormente evaluarse, priorizarse y someterse a procesos de experimentación.

| Dimensión                           | Situación actual                                                      | Implicación para las organizaciones                                           |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Madurez del hardware</b>         | Dispositivos NISQ con número limitado de qubits y ruido significativo | Las aplicaciones deben diseñarse para hardware limitado o simuladores         |
| <b>Desarrollo algorítmico</b>       | Algoritmos cuánticos en fase activa de investigación                  | Muchas aplicaciones requieren enfoques híbridos cuántico-clásicos             |
| <b>Ecosistema industrial</b>        | Ausencia de estándares consolidados y metodologías de adopción        | Las organizaciones necesitan marcos estructurados para explorar la tecnología |
| <b>Horizonte temporal</b>           | Incertidumbre sobre cuándo se alcanzará ventaja cuántica práctica     | Las iniciativas actuales se centran en experimentación y aprendizaje          |
| <b>Complejidad de los problemas</b> | Dificultad para identificar problemas adecuados                       | Se requiere un proceso sistemático de descubrimiento de casos de uso          |

## 3.2 Metodología de descubrimiento de casos de uso

El proceso de descubrimiento de casos de uso se basa en la identificación de problemas que presentan **alta complejidad computacional**, y que potencialmente podrían beneficiarse de algoritmos cuánticos o enfoques híbridos cuántico-clásicos.

La metodología utilizada combina tres tipos de análisis:

### Análisis de problemas empresariales

Identificación de problemas presentes en procesos industriales, operativos o científicos que presentan características como:

- combinatoria elevada
- optimización bajo múltiples restricciones
- simulación de sistemas físicos complejos
- análisis de grandes espacios de soluciones

Estos problemas suelen aparecer en áreas como:

- logística
- planificación industrial
- diseño de materiales
- gestión energética
- análisis financiero

### **Análisis de formulación matemática**

Una vez identificado un problema empresarial, se analiza su formulación matemática para evaluar si puede ser representado mediante modelos computacionales compatibles con algoritmos cuánticos.

Entre las formulaciones más comunes se encuentran:

- problemas QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization)
- problemas de optimización combinatoria
- simulaciones de sistemas cuánticos
- problemas de aprendizaje automático

Este análisis permite determinar si el problema puede transformarse en un formato compatible con algoritmos cuánticos actuales.

### **Análisis de viabilidad tecnológica**

Finalmente, se evalúa el nivel de madurez tecnológica necesario para abordar el problema mediante computación cuántica.

Este análisis considera factores como:

- disponibilidad de algoritmos adecuados
- madurez del hardware cuántico
- escalabilidad del problema
- disponibilidad de datasets adecuados

Este análisis permite distinguir entre:

- **casos de uso experimentales** (exploración tecnológica)
- **casos de uso potencialmente aplicables en el medio plazo**

| Etapa                                            | Objetivo                                                           | Actividades principales                                                                                   | Resultados                                                    |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| <b>Identificación de problemas empresariales</b> | Detectar problemas de alta complejidad computacional               | Análisis de procesos operativos, entrevistas con expertos de dominio, análisis de sistemas existentes     | Lista inicial de problemas candidatos                         |
| <b>Análisis de formulación matemática</b>        | Evaluar la representabilidad computacional del problema            | Modelización matemática, análisis de estructura combinatoria, identificación de variables y restricciones | Problemas formulados en modelos matemáticos                   |
| <b>Análisis de compatibilidad cuántica</b>       | Determinar si el problema puede abordarse con algoritmos cuánticos | Evaluación de formulaciones QUBO, optimización combinatoria, simulación cuántica                          | Problemas potencialmente compatibles con algoritmos cuánticos |
| <b>Evaluación de viabilidad tecnológica</b>      | Analizar la aplicabilidad en función de la madurez tecnológica     | Revisión de algoritmos disponibles, limitaciones de hardware, escalabilidad del problema                  | Clasificación del caso de uso por horizonte tecnológico       |

| Característica del problema            | Descripción                                                                | Ejemplos                                                  |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| <b>Alta combinatoria</b>               | Gran número de combinaciones posibles de soluciones                        | planificación logística, scheduling industrial            |
| <b>Optimización bajo restricciones</b> | Decisiones sujetas a múltiples condiciones y dependencias                  | optimización de redes energéticas, asignación de recursos |
| <b>Simulación de sistemas físicos</b>  | Modelización de sistemas con comportamiento cuántico o molecular           | simulación molecular, diseño de materiales                |
| <b>Espacios de búsqueda complejos</b>  | Problemas con gran dimensionalidad o múltiples variables interdependientes | optimización financiera, diseño de estructuras            |

### 3.3 Fuentes de identificación de casos de uso

Los casos de uso pueden identificarse a partir de diversas fuentes de información, combinando conocimiento sectorial, análisis tecnológico y experiencias previas de investigación. Entre las principales fuentes utilizadas se encuentran:

#### **Procesos empresariales existentes**

Análisis de procesos operativos donde la complejidad computacional es especialmente elevada, como por ejemplo:

- planificación logística
- optimización de redes de distribución
- gestión de infraestructuras energéticas
- planificación de recursos

#### **Problemas científicos o industriales**

Algunos casos de uso provienen de retos científicos o industriales complejos, como:

- simulación de moléculas
- modelización de materiales
- optimización de procesos químicos
- modelización de fenómenos físicos complejos

#### **Literatura científica y tecnológica**

El análisis de publicaciones científicas, programas de investigación y proyectos industriales permite identificar áreas donde la computación cuántica muestra mayor potencial de impacto.

Entre los dominios más estudiados destacan:

- optimización combinatoria
- química cuántica
- machine learning cuántico
- criptografía

#### **Programas de innovación y retos industriales**

Las organizaciones también pueden identificar oportunidades a través de programas de innovación abierta, donde empresas o instituciones plantean retos tecnológicos específicos al ecosistema. Este enfoque permite generar nuevos casos de uso en colaboración con:

- startups
- centros tecnológicos
- universidades
- empresas tecnológicas

| Fuente de identificación       | Descripción                                                         | Ejemplos                                                            |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| <b>Procesos empresariales</b>  | Análisis de procesos operativos con alta complejidad computacional  | planificación logística, optimización de redes                      |
| <b>Problemas científicos</b>   | Retos complejos en investigación científica o ingeniería            | simulación molecular, modelización de materiales                    |
| <b>Literatura científica</b>   | Revisión de publicaciones y proyectos de investigación              | algoritmos de optimización, quantum machine learning                |
| <b>Programas de innovación</b> | Retos planteados por empresas o instituciones                       | desafíos de optimización industrial, retos tecnológicos sectoriales |
| <b>Ecosistema tecnológico</b>  | Colaboración con startups, universidades y centros de investigación | proyectos piloto, pruebas de concepto                               |

### 3.4 Tipologías de casos de uso en computación cuántica

Los casos de uso identificados pueden clasificarse en diferentes categorías según el tipo de problema computacional que abordan.

Las categorías principales incluyen:

#### Problemas de optimización

Los problemas de optimización constituyen uno de los dominios con mayor potencial de aplicación de algoritmos cuánticos.

Ejemplos incluyen:

- optimización de rutas logísticas
- planificación de producción



- optimización de redes energéticas
- optimización de carteras financieras

Estos problemas suelen caracterizarse por la existencia de un gran número de combinaciones posibles de soluciones.

### **Simulación de sistemas físicos y químicos**

La simulación de sistemas cuánticos es uno de los casos de uso más prometedores de la computación cuántica.

Aplicaciones incluyen:

- simulación molecular
- diseño de materiales
- química computacional
- modelización de interacciones químicas

Estas aplicaciones tienen especial relevancia en sectores como:

- farmacéutico
- químico
- energético

### **Machine learning y análisis de datos**

La computación cuántica también puede aplicarse al desarrollo de algoritmos de aprendizaje automático.

Entre las aplicaciones potenciales destacan:

- clasificación de datos
- clustering
- optimización del entrenamiento de modelos
- reducción de dimensionalidad

Aunque esta área se encuentra en una fase temprana de investigación, existe un interés creciente en explorar algoritmos híbridos cuántico-clásicos.

### **Problemas financieros**

El sector financiero ha sido uno de los primeros en explorar aplicaciones de computación cuántica.

Ejemplos incluyen:

- optimización de carteras
- cálculo de riesgo
- modelización de derivados financieros
- simulaciones Monte Carlo aceleradas

| Categoría de aplicación          | Tipo de problema                                                | Ejemplos de aplicaciones                                                     | Sectores relevantes             |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Optimización</b>              | Problemas combinatorios con gran espacio de soluciones          | optimización logística, planificación de producción, optimización energética | logística, manufactura, energía |
| <b>Simulación</b>                | Modelización de sistemas físicos o químicos                     | simulación molecular, diseño de materiales                                   | farmacéutico, químico, energía  |
| <b>Machine learning cuántico</b> | Procesamiento y análisis de datos mediante algoritmos cuánticos | clasificación, clustering, reducción de dimensionalidad                      | tecnología, finanzas            |
| <b>Finanzas</b>                  | Problemas cuantitativos de modelización y optimización          | optimización de carteras, simulaciones Monte Carlo                           | banca, gestión de activos       |

### 3.5 Ficha estructurada de caso de uso

| Campo                                   | Descripción                                                          |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| <b>Nombre del caso de uso</b>           | Identificador breve del problema                                     |
| <b>Industria</b>                        | Sector donde se aplica el problema                                   |
| <b>Descripción del problema</b>         | Explicación del reto empresarial o científico                        |
| <b>Formulación matemática</b>           | Modelo computacional asociado (QUBO, optimización, simulación, etc.) |
| <b>Algoritmos cuánticos potenciales</b> | Algoritmos aplicables (QAOA, VQE, quantum annealing, etc.)           |

|                                     |                                               |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>Enfoque híbrido</b>              | Posible integración con métodos clásicos      |
| <b>Nivel de madurez tecnológica</b> | Exploratorio / medio plazo / largo plazo      |
| <b>Impacto potencial</b>            | Beneficio esperado si se resuelve el problema |
| <b>Disponibilidad de datos</b>      | Existencia o acceso a datasets relevantes     |

## 3.6 Catálogo de casos de uso

La utilización de fichas estructuradas de casos de uso permite construir catálogos organizados de aplicaciones potenciales de computación cuántica, facilitando su análisis comparativo, priorización y seguimiento a lo largo del tiempo.

Estos catálogos constituyen una herramienta clave para estructurar la exploración tecnológica dentro de organizaciones y ecosistemas de innovación, ya que permiten sistematizar el conocimiento generado durante las fases de descubrimiento y evaluación de oportunidades.

Los casos de uso identificados pueden clasificarse según diferentes criterios, lo que permite organizar la información desde distintas perspectivas relevantes para la toma de decisiones tecnológicas. Entre los criterios de clasificación más habituales se encuentran:

**Clasificación por industria.** Permite agrupar los casos de uso según el sector económico o dominio de aplicación en el que se sitúa el problema. Algunos de los sectores donde actualmente se concentra mayor actividad en computación cuántica incluyen:

- **Energía**, incluyendo optimización de redes eléctricas, planificación de generación y modelización de sistemas energéticos complejos.
- **Logística y transporte**, especialmente en problemas de optimización de rutas, planificación de flotas y diseño de redes de distribución.
- **Finanzas**, con aplicaciones en optimización de carteras, modelización de riesgo y simulaciones estocásticas.
- **Industria química y farmacéutica**, donde la simulación cuántica puede contribuir al diseño de moléculas, materiales o procesos químicos.
- **Manufactura**, en problemas de planificación de producción, asignación de recursos y optimización de procesos industriales.

Esta clasificación facilita identificar sectores donde la computación cuántica puede generar mayor impacto potencial, así como comparar iniciativas desarrolladas en diferentes industrias.

**Clasificación por tipo de problema computacional.** Los casos de uso también pueden clasificarse según la naturaleza del problema computacional que abordan. Entre las categorías más comunes se encuentran:

- **optimización**, especialmente en problemas combinatorios con grandes espacios de soluciones
- **simulación de sistemas físicos o químicos**, donde la naturaleza cuántica de los sistemas modelizados resulta especialmente relevante
- **machine learning y análisis de datos**, incluyendo algoritmos de aprendizaje automático cuántico o enfoques híbridos cuántico-clásicos

Esta clasificación permite relacionar los casos de uso con familias de algoritmos cuánticos potencialmente aplicables, facilitando la evaluación de su viabilidad técnica.

**Clasificación por horizonte tecnológico.** Finalmente, los casos de uso pueden clasificarse en función de su horizonte estimado de aplicabilidad, teniendo en cuenta el nivel actual de madurez del hardware y de los algoritmos cuánticos. Habitualmente se distinguen tres categorías principales:

- **experimentación inmediata**, casos que pueden explorarse mediante prototipos o pruebas de concepto utilizando hardware cuántico actual o simuladores
- **medio plazo**, aplicaciones que podrían beneficiarse de mejoras moderadas en el número de qubits, fidelidad de las operaciones o técnicas de mitigación de ruido
- **investigación avanzada**, casos que requieren avances significativos en escalabilidad, corrección de errores o desarrollo algorítmico

La construcción de catálogos estructurados de casos de uso permite a organizaciones, centros de investigación y administraciones públicas:

- **identificar oportunidades concretas de experimentación tecnológica**, alineadas con necesidades reales de negocio o investigación
- **priorizar áreas de investigación aplicada**, concentrando recursos en dominios con mayor potencial de impacto
- **estructurar programas de adopción tecnológica**, definiendo hojas de ruta progresivas para la exploración y maduración de aplicaciones cuánticas

Además, estos catálogos facilitan la colaboración entre empresas, centros de investigación, startups y proveedores tecnológicos, al proporcionar un lenguaje común para describir problemas, evaluar su viabilidad y coordinar iniciativas de desarrollo conjunto.

| Dimensión de clasificación            | de          | Objetivo                                                                                   | Categorías principales                                                                                     | Ejemplos representativos                                                                                                               |
|---------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Industria dominio aplicación</b>   | <b>o de</b> | Identificar sectores donde la computación cuántica puede generar mayor impacto potencial   | Energía, logística y transporte, finanzas, química y farmacéutica, manufactura                             | Optimización de redes eléctricas, planificación logística, optimización de carteras, simulación molecular, planificación de producción |
| <b>Tipo de problema computacional</b> |             | Relacionar los casos de uso con estructuras matemáticas y familias de algoritmos cuánticos | Optimización combinatoria, simulación de sistemas físicos o químicos, machine learning y análisis de datos | Optimización de rutas, simulación de materiales, clustering o clasificación de datos                                                   |
| <b>Horizonte tecnológico</b>          |             | Evaluar la viabilidad temporal de los casos de uso según la madurez tecnológica            | Experimentación inmediata, medio plazo, investigación avanzada                                             | Prototipos en hardware NISQ, aplicaciones híbridas futuras, simulaciones que requieren hardware tolerante a fallos                     |

### 3.7 Implementación en plataforma digital para el descubrimiento de casos de uso

La aplicación práctica de la metodología de descubrimiento de casos de uso requiere herramientas que permitan estructurar, documentar y analizar oportunidades de forma sistemática. En ausencia de herramientas adecuadas, el proceso de identificación de casos de uso suele realizarse de manera manual mediante talleres, documentos o análisis ad hoc, lo que dificulta la gestión de grandes volúmenes de oportunidades y la comparación entre ellas.

Para facilitar este proceso, se han desarrollado plataformas digitales que permiten **organizar el descubrimiento de casos de uso como un proceso estructurado**, integrando herramientas de análisis, catalogación y generación de oportunidades.

En el caso de la plataforma desarrollada por **QCentroid**, estas capacidades se implementan mediante el módulo **Business Studio**, que permite gestionar de forma estructurada el proceso de identificación y documentación de casos de uso cuánticos.

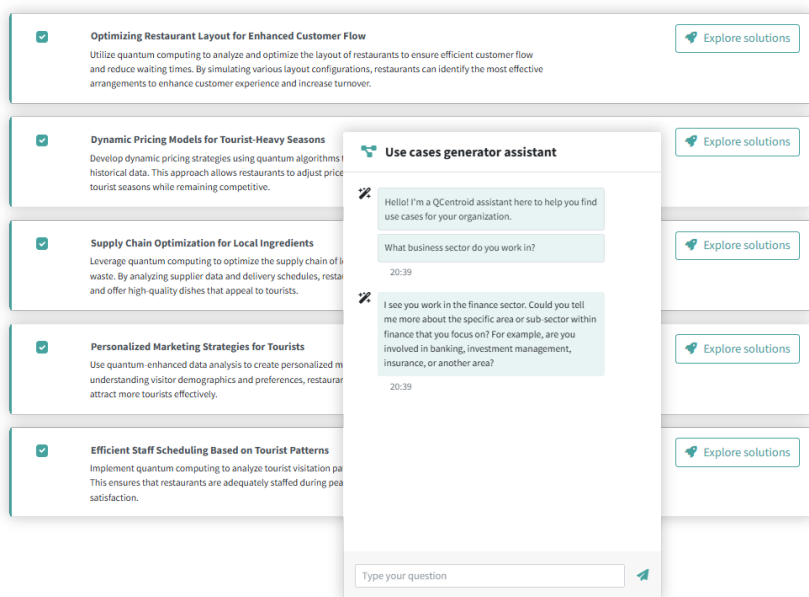
#### Generación estructurada de casos de uso

Una de las principales funcionalidades de la plataforma consiste en facilitar la **generación estructurada de casos de uso**, permitiendo documentar oportunidades de aplicación de computación cuántica de forma sistemática.

Las herramientas de la plataforma permiten generar fichas de casos de uso que incluyen elementos como:

- descripción del problema empresarial o científico
- sector o industria de aplicación
- formulación computacional del problema
- algoritmos cuánticos potencialmente aplicables
- horizonte estimado de madurez tecnológica

Este enfoque permite convertir procesos de exploración tecnológica que tradicionalmente son informales en **procesos estructurados y documentados**.



Generación de casos de uso en Business Studio

## Gestión de catálogos de oportunidades

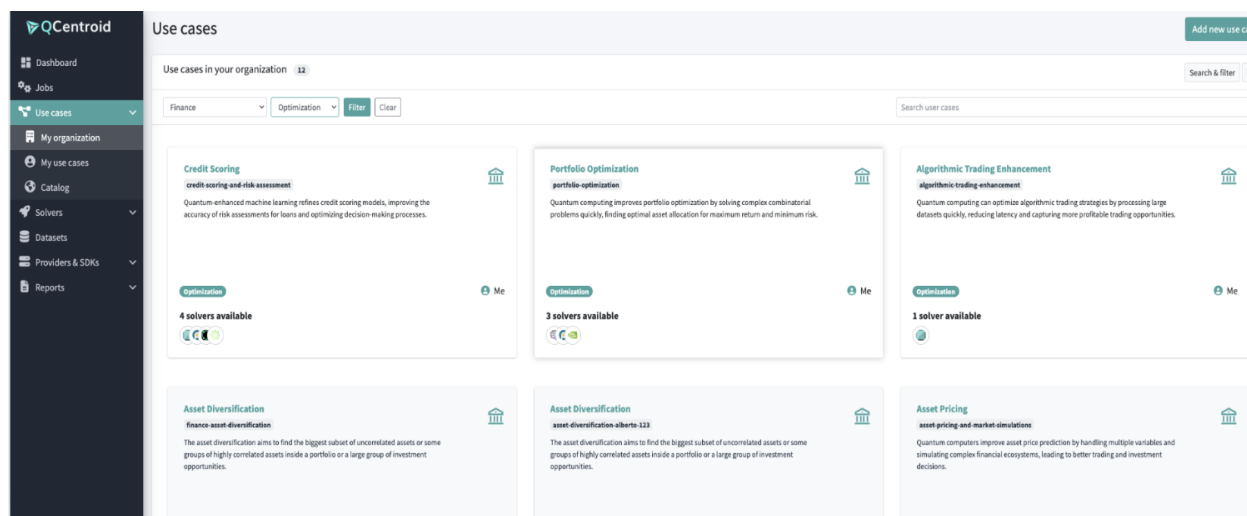
Los casos de uso generados pueden organizarse dentro de **catálogos estructurados de oportunidades**, que permiten analizar el potencial de la computación cuántica en diferentes sectores.

Estos catálogos pueden clasificarse según distintos criterios:

- industria o sector económico

- tipo de problema computacional
- nivel de madurez tecnológica
- potencial de impacto

La gestión estructurada de estos catálogos permite a organizaciones y ecosistemas tecnológicos **identificar patrones de oportunidad y áreas prioritarias de experimentación.**



Catálogo de casos de uso en Business Studio

## Análisis asistido de oportunidades

Las plataformas digitales también permiten facilitar el análisis de oportunidades mediante herramientas que ayudan a estructurar la información asociada a cada caso de uso.

Estas herramientas permiten:

- analizar las características computacionales del problema
- identificar formulaciones matemáticas adecuadas
- sugerir posibles algoritmos cuánticos aplicables
- estructurar la información necesaria para fases posteriores de priorización y experimentación

Este enfoque permite reducir la barrera de entrada para organizaciones interesadas en explorar el potencial de la computación cuántica.



### Ejemplo de caso de uso en Business Studio

### Ejemplo de caso de uso en Business Studio

### 3.7.4 Integración con procesos de priorización

Los casos de uso generados en la plataforma pueden posteriormente integrarse en los procesos de **priorización descritos en la sección siguiente**, permitiendo evaluar de forma estructurada el impacto potencial y la viabilidad técnica de cada oportunidad.

La digitalización de este proceso permite:

- comparar múltiples oportunidades de forma sistemática
- generar matrices de priorización
- construir roadmaps de experimentación tecnológica

De esta manera, las herramientas digitales actúan como soporte operativo para la transición entre las fases de **descubrimiento, priorización y experimentación** dentro del proceso de adopción de computación cuántica.

## 4. Priorización de casos de uso

### 4.1 Objetivo de la priorización

Tras la fase de identificación de casos de uso potenciales, el siguiente paso consiste en determinar cuáles de ellos presentan **mayor potencial para avanzar hacia fases de experimentación tecnológica y desarrollo de pruebas de concepto**.

Dado que la computación cuántica es una tecnología aún emergente, no todos los casos de uso identificados presentan el mismo nivel de viabilidad técnica o impacto potencial. Por este motivo, resulta necesario aplicar una metodología estructurada de priorización que permita:

- identificar las oportunidades con mayor potencial de generación de valor  
seleccionar los casos de uso más adecuados para fases iniciales de experimentación
- optimizar la asignación de recursos en programas de adopción tecnológica
- construir un roadmap progresivo de desarrollo de soluciones cuánticas

El proceso de priorización permite transformar un catálogo amplio de oportunidades potenciales en un **conjunto reducido de casos de uso prioritarios**, que serán objeto de experimentación y desarrollo tecnológico.

### 4.2 Marco de evaluación (impacto vs viabilidad)

La metodología de priorización se basa en un modelo de evaluación que combina dos dimensiones principales:

#### **Impacto potencial**

Evalúa el valor que la resolución del problema mediante computación cuántica podría generar para una organización o sector.

#### **Viabilidad técnica**

Evalúa el grado en que el problema puede abordarse mediante algoritmos cuánticos en el contexto del estado actual de la tecnología. Estas dos dimensiones permiten construir una **matriz de evaluación de oportunidades**, donde cada caso de uso se posiciona según su nivel de impacto y viabilidad.

Este enfoque permite distinguir entre diferentes categorías de oportunidades:

- Casos de uso prioritarios

- Casos de uso exploratorios
- Casos de uso de investigación a largo plazo

| Dimensión                 | Objetivo de evaluación                                                                                 | Pregunta clave                                                                                                | Resultado de la evaluación                     |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| <b>Impacto potencial</b>  | Estimar el valor que la resolución del problema mediante computación cuántica podría generar           | ¿Qué beneficios económicos, operativos o estratégicos se obtendrían si el problema se resolviera eficazmente? | Estimación del valor potencial del caso de uso |
| <b>Viabilidad técnica</b> | Evaluar si el problema puede abordarse mediante algoritmos cuánticos en el contexto tecnológico actual | ¿Es técnicamente posible desarrollar una solución cuántica experimental para este problema?                   | Estimación de la factibilidad tecnológica      |

### 4.3 Evaluación del impacto potencial

La dimensión de impacto potencial analiza el valor que la aplicación de computación cuántica podría generar en relación con un problema determinado. Esta evaluación considera diferentes tipos de impacto, entre los que destacan:

#### Impacto económico

Evaluación del potencial de mejora en términos de eficiencia económica o generación de valor. Ejemplos incluyen:

- reducción de costes operativos
- mejora en la asignación de recursos
- optimización de procesos industriales
- generación de nuevas capacidades analíticas

#### Impacto en eficiencia computacional

En algunos casos, la computación cuántica puede ofrecer mejoras en la eficiencia computacional respecto a métodos clásicos. Este impacto se analiza en términos de:

- reducción del tiempo de cálculo
- mejora en la calidad de las soluciones
- capacidad para abordar problemas de mayor escala

## Impacto en sostenibilidad y eficiencia energética

En el contexto de programas orientados a sostenibilidad y tecnologías climáticas, también se evalúa el impacto potencial en variables relacionadas con:

- optimización del consumo energético
- gestión eficiente de recursos
- optimización de redes energéticas
- mejora en la eficiencia de procesos industriales

Este tipo de impacto resulta especialmente relevante en el contexto de iniciativas relacionadas con los **Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)** y la transición energética.

| Dimensión de impacto                  | Descripción                                                                                   | Ejemplos de indicadores                                                           |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Impacto económico</b>              | Potencial de generación de valor o reducción de costes asociados a la resolución del problema | reducción de costes operativos, mejora de eficiencia, incremento de productividad |
| <b>Impacto computacional</b>          | Mejora potencial en la eficiencia computacional frente a métodos clásicos                     | reducción del tiempo de cálculo, mejora de la calidad de las soluciones           |
| <b>Impacto estratégico científico</b> | Capacidad de generar nuevas capacidades tecnológicas o analíticas                             | desarrollo de nuevas capacidades de simulación o modelización                     |
| <b>Impacto en sostenibilidad</b>      | Contribución a objetivos de eficiencia energética o sostenibilidad                            | optimización energética, mejora en eficiencia de recursos                         |

## 4.4 Evaluación de la viabilidad técnica

La segunda dimensión del proceso de priorización evalúa la viabilidad técnica de aplicar computación cuántica a un problema determinado.

Este análisis considera varios factores.

## **Adecuación algorítmica**

Se analiza si el problema puede representarse mediante una formulación matemática compatible con algoritmos cuánticos conocidos. Entre las formulaciones más relevantes se encuentran:

- problemas QUBO
- optimización combinatoria
- simulación cuántica
- algoritmos variacionales

Este análisis permite determinar si existen algoritmos cuánticos potencialmente aplicables.

## **Escalabilidad del problema**

Se evalúa si el tamaño del problema puede abordarse mediante el hardware cuántico disponible actualmente o mediante simuladores cuánticos. Este análisis incluye aspectos como:

- número de variables
- complejidad combinatoria
- requisitos de precisión

## **Disponibilidad de datos**

La disponibilidad y calidad de los datos necesarios para modelar el problema es un factor crítico para la experimentación. Se evalúan aspectos como:

- disponibilidad de datasets
- estructura de los datos
- posibilidad de utilizar datos sintéticos

## **Madurez tecnológica**

Finalmente, se evalúa el nivel de madurez de las tecnologías necesarias para abordar el caso de uso. Esto incluye:

- madurez de algoritmos cuánticos relevantes
- disponibilidad de herramientas de desarrollo
- estado del hardware cuántico

Este análisis permite distinguir entre casos de uso con aplicabilidad inmediata y aquellos que requieren mayor desarrollo tecnológico.

| Factor de viabilidad              | Descripción                                                                      | Elementos evaluados                                                     |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <b>Adecuación algorítmica</b>     | Compatibilidad del problema con formulaciones utilizadas en algoritmos cuánticos | formulación QUBO, optimización combinatoria, simulación cuántica        |
| <b>Escalabilidad del problema</b> | Capacidad de abordar el problema con el hardware cuántico disponible             | número de variables, complejidad combinatoria                           |
| <b>Disponibilidad de datos</b>    | Acceso a los datos necesarios para modelar y experimentar con el problema        | datasets disponibles, calidad de datos, posibilidad de datos sintéticos |
| <b>Madurez tecnológica</b>        | Nivel de desarrollo de algoritmos, herramientas y hardware necesarios            | disponibilidad de SDKs cuánticos, madurez del hardware                  |

## 4.5 Metodología de scoring

Para facilitar la comparación entre diferentes casos de uso, se utiliza un sistema de scoring que permite cuantificar las dimensiones de impacto y viabilidad. Cada caso de uso se evalúa mediante un conjunto de criterios que reciben una puntuación en una escala predefinida.

Ejemplo de criterios evaluados:

Impacto

- potencial de generación de valor económico
- impacto en eficiencia operativa
- impacto en sostenibilidad

Viabilidad

- adecuación algorítmica
- disponibilidad de datos
- complejidad del problema
- madurez tecnológica

Las puntuaciones obtenidas permiten calcular una valoración global del caso de uso. Este enfoque facilita la comparación entre diferentes oportunidades y permite identificar aquellas que presentan el mejor equilibrio entre impacto y viabilidad.

| Criterio                       | Dimensión  | Escala de evaluación | Descripción                                                     |
|--------------------------------|------------|----------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Potencial de valor económico   | Impacto    | 1-5                  | Estimación del valor económico que podría generarse             |
| Mejora en eficiencia operativa | Impacto    | 1-5                  | Grado de mejora en procesos o eficiencia                        |
| Impacto en sostenibilidad      | Impacto    | 1-5                  | Contribución potencial a eficiencia energética o sostenibilidad |
| Adecuación algorítmica         | Viabilidad | 1-5                  | Nivel de compatibilidad con algoritmos cuánticos conocidos      |
| Disponibilidad de datos        | Viabilidad | 1-5                  | Existencia de datos necesarios para experimentación             |
| Madurez tecnológica            | Viabilidad | 1-5                  | Nivel de desarrollo de hardware y herramientas                  |

## 4.6 Generación de mapas de oportunidades

Los resultados del proceso de evaluación se representan mediante mapas de oportunidades que permiten visualizar la posición relativa de los distintos casos de uso. El formato más habitual consiste en una matriz bidimensional donde se representan:

- impacto potencial
- viabilidad técnica

Este tipo de representación facilita la identificación de diferentes categorías de oportunidades.

- **Casos de uso prioritarios.** Problemas con alto impacto potencial y viabilidad técnica suficiente para avanzar hacia fases de experimentación.
- **Casos de uso exploratorios.** Problemas con impacto potencial elevado pero mayor incertidumbre tecnológica.
- **Casos de uso de investigación.** Problemas con gran interés científico pero baja viabilidad tecnológica en el corto plazo.

## 4.6 Generación de mapas de oportunidades

El resultado final del proceso de priorización consiste en la generación de un **roadmap de casos de uso**, que define una secuencia estructurada de oportunidades para la exploración tecnológica. Este roadmap permite organizar las oportunidades en diferentes horizontes temporales:

- **Corto plazo.** Casos de uso adecuados para desarrollo de pruebas de concepto utilizando hardware cuántico disponible o simuladores.
- **Medio plazo.** Casos de uso que requieren avances adicionales en algoritmos o hardware.
- **Largo plazo.** Casos de uso con alto potencial de impacto pero que dependen de desarrollos futuros en computación cuántica.

Este enfoque permite a las organizaciones desarrollar programas de adopción tecnológica progresivos, reduciendo riesgos y facilitando la generación de conocimiento aplicado.

## 4.7 Implementación en plataforma digital

La priorización de casos de uso requiere herramientas que permitan evaluar de forma sistemática múltiples oportunidades de aplicación de computación cuántica, considerando simultáneamente su impacto potencial y su viabilidad técnica.

Cuando el número de oportunidades identificadas es elevado, la priorización manual resulta difícil de gestionar, especialmente en programas de innovación donde participan múltiples actores o donde los casos de uso proceden de distintos sectores industriales.

Para facilitar este proceso se utilizan plataformas digitales que permiten estructurar, evaluar y comparar oportunidades de forma sistemática, generando mapas de priorización y roadmaps tecnológicos.

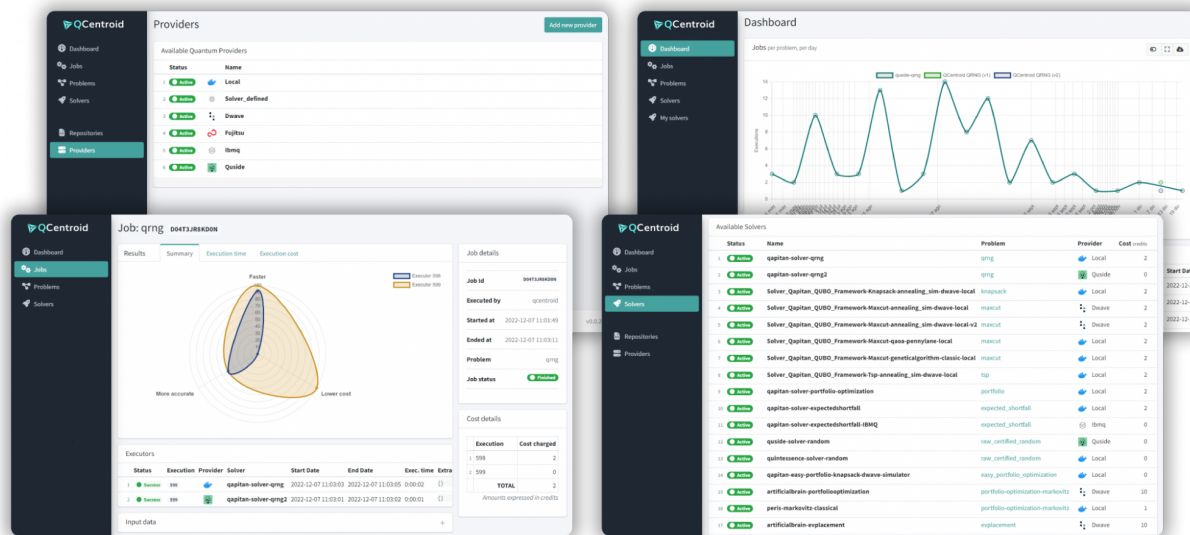
La plataforma desarrollada por QCentroid integra estas capacidades dentro de su módulo Business Studio, permitiendo aplicar metodologías de priorización de forma estructurada y reproducible.

### Evaluación estructurada de oportunidades

La plataforma permite evaluar cada caso de uso mediante fichas estructuradas que incorporan los criterios de priorización definidos en la metodología.

Cada criterio puede evaluarse mediante escalas de puntuación predefinidas, permitiendo obtener una valoración agregada del caso de uso.

Este enfoque facilita la comparación entre oportunidades procedentes de diferentes sectores o dominios tecnológicos.



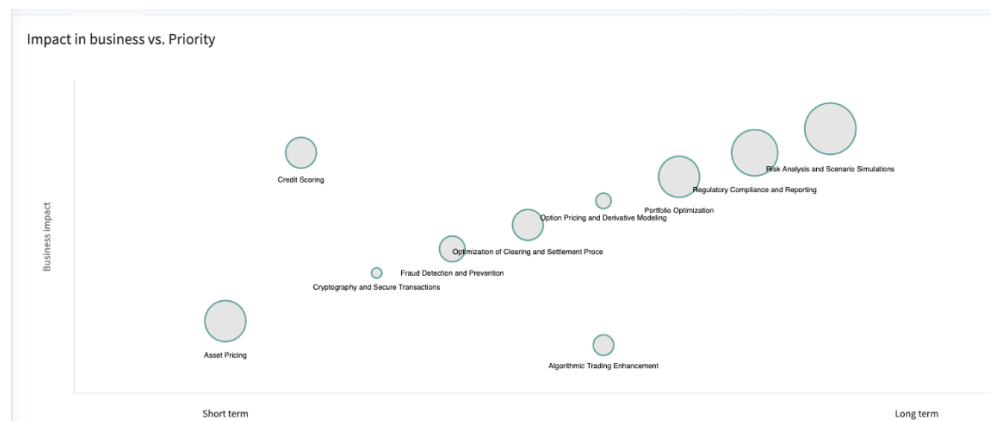
Evaluación de caso de uso en la plataforma

## Generación de matrices de priorización

Las herramientas digitales permiten representar los resultados de la evaluación mediante **matrices de priorización**, donde los casos de uso se posicionan según su impacto potencial y su viabilidad técnica. Este tipo de visualización permite identificar rápidamente:

- casos de uso prioritarios para experimentación
- oportunidades exploratorias
- casos de uso que requieren mayor investigación tecnológica

Las matrices de priorización facilitan la toma de decisiones estratégicas dentro de programas de adopción tecnológica.



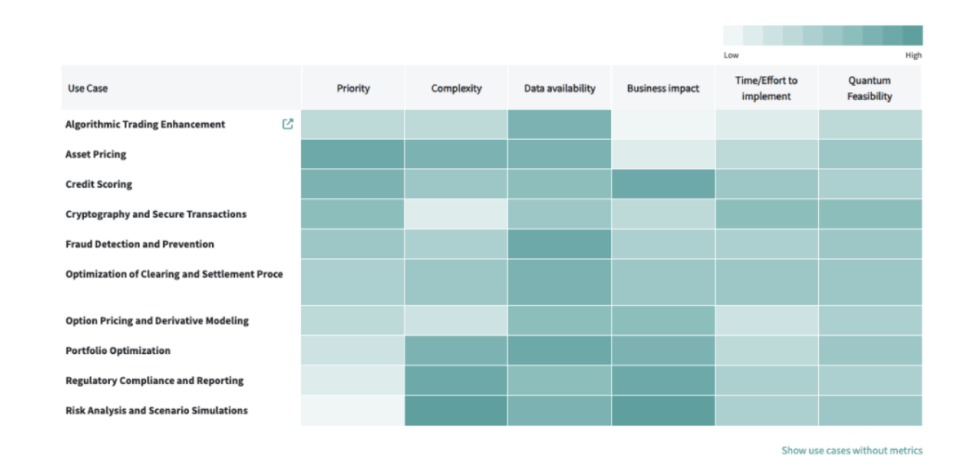
Matriz de priorización

## Construcción de roadmaps de experimentación

Los resultados de la priorización pueden utilizarse para generar **roadmaps de desarrollo de casos de uso**, organizando las oportunidades según horizontes temporales o niveles de madurez tecnológica. La plataforma permite estructurar estos roadmaps considerando factores como:

- nivel de impacto esperado
- complejidad de implementación
- disponibilidad de tecnologías necesarias
- alineación con objetivos estratégicos

Esto permite definir programas progresivos de experimentación y desarrollo tecnológico.



Roadmap de casos de uso priorizados

## **Integración con fases de experimentación**

Los casos de uso priorizados pueden integrarse directamente en los procesos de experimentación descritos en la sección siguiente.

La integración entre las fases de descubrimiento, priorización y experimentación permite:

- seleccionar automáticamente casos de uso para pruebas de concepto
- gestionar portafolios de experimentos tecnológicos
- documentar el progreso de iniciativas de innovación

De esta manera, las herramientas digitales permiten conectar la evaluación estratégica de oportunidades con los procesos operativos de experimentación tecnológica.

## 5. Ciclos de experimentación y desarrollo de PoCs

### 5.1 Objetivo de la experimentación tecnológica

Una vez identificados y priorizados los casos de uso potenciales, el siguiente paso consiste en validar su viabilidad mediante procesos de experimentación tecnológica controlados.

La experimentación permite evaluar si la computación cuántica puede aportar ventajas respecto a soluciones clásicas existentes, tanto en términos de rendimiento computacional como de calidad de las soluciones obtenidas.

En esta fase se desarrollan pruebas de concepto (Proof of Concept – PoC) que permiten:

- validar la formulación computacional del problema
- implementar algoritmos cuánticos o híbridos cuántico-clásicos
- evaluar el rendimiento frente a métodos clásicos
- analizar los requisitos de datos y escalabilidad

El objetivo no es todavía desarrollar soluciones productivas, sino generar evidencia experimental sobre el potencial de la computación cuántica para resolver problemas concretos.

### 5.2 Metodología de experimentación

La experimentación se organiza mediante **ciclos iterativos de desarrollo**, donde se evalúan distintas formulaciones, algoritmos y configuraciones tecnológicas. Cada ciclo experimental sigue una secuencia estructurada de etapas.

| Etapa                          | Descripción                                                  |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>Definición del problema</b> | Formalización del problema empresarial o científico          |
| <b>Modelización</b>            | Traducción del problema a una formulación computacional      |
| <b>Selección de algoritmos</b> | Identificación de algoritmos cuánticos o híbridos aplicables |
| <b>Implementación</b>          | Desarrollo del modelo en entornos de programación cuántica   |
| <b>Ejecución experimental</b>  | Ejecución de experimentos en simuladores o hardware cuántico |

|                                 |           |                                                            |
|---------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------|
| <b>Evaluación de resultados</b> | <b>de</b> | Análisis de rendimiento y comparación con métodos clásicos |
|---------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------|

Este enfoque permite mejorar progresivamente las soluciones mediante iteraciones sucesivas.

## 5.3 Diseño de pruebas de concepto (PoC)

Las pruebas de concepto constituyen experimentos controlados diseñados para evaluar la aplicabilidad de algoritmos cuánticos en un problema específico.

Cada PoC se documenta mediante una ficha estructurada de experimento, que permite registrar de forma sistemática los elementos relevantes del proceso.

| Elemento                                 | Descripción                                       |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>Caso de uso</b>                       | Problema empresarial o científico abordado        |
| <b>Formulación matemática</b>            | Modelo computacional utilizado                    |
| <b>Algoritmos implementados</b>          | Algoritmos cuánticos o híbridos                   |
| <b>Algoritmos clásicos de referencia</b> | Métodos tradicionales utilizados para comparación |
| <b>Dataset utilizado</b>                 | Datos utilizados en la experimentación            |
| <b>Hardware de ejecución</b>             | Simulador cuántico o hardware específico          |
| <b>Métricas evaluadas</b>                | Métricas utilizadas para comparar resultados      |

Esta estructura facilita la reproducibilidad de experimentos y permite comparar diferentes aproximaciones.

## 5.4 Formulación computacional del problema

Uno de los pasos más importantes en el desarrollo de una PoC consiste en traducir el problema empresarial a una formulación matemática compatible con algoritmos cuánticos. Las formulaciones más utilizadas incluyen:

## Problemas QUBO

Muchos problemas de optimización pueden representarse mediante modelos **Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO)**, que constituyen una de las formulaciones más comunes en computación cuántica.

Este tipo de modelos permite representar problemas combinatorios mediante variables binarias.

## Problemas de optimización combinatoria

Entre los problemas más frecuentes destacan:

- optimización de rutas
- asignación de recursos
- planificación de producción
- scheduling

Estos problemas pueden resolverse mediante algoritmos variacionales o técnicas de annealing cuántico.

## Problemas de simulación cuántica

En áreas como química o ciencia de materiales, las PoCs pueden centrarse en la simulación de sistemas cuánticos. Estos problemas incluyen:

- simulación molecular
- cálculo de estados energéticos
- modelización de interacciones químicas

## 5.5 Implementación de algoritmos

Una vez formulado el problema, se procede a la implementación de algoritmos cuánticos o híbridos. Entre los algoritmos más utilizados en experimentación destacan:

| Tipo de algoritmo        | Tipo de problema          | Aplicación típica                           |
|--------------------------|---------------------------|---------------------------------------------|
| <b>QAOA</b>              | Optimización combinatoria | scheduling, routing, asignación de recursos |
| <b>VQE</b>               | Simulación cuántica       | química computacional, materiales           |
| <b>Quantum annealing</b> | Problemas QUBO            | optimización combinatoria                   |

|                                              |                                 |                                            |
|----------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>Algoritmos híbridos cuántico-clásicos</b> | Optimización y machine learning | optimización variacional, modelos híbridos |
|----------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|

En muchos casos se utilizan enfoques híbridos donde parte del cálculo se realiza en hardware cuántico y parte en sistemas clásicos.

## 5.6 Ejecución de experimentos

Los experimentos pueden ejecutarse en diferentes entornos computacionales dependiendo del tamaño del problema y del objetivo del experimento.

### Entornos de ejecución disponibles

| Entorno                       | Descripción                                                           | Uso típico en experimentación           |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>Simuladores cuánticos</b>  | Ejecución de circuitos cuánticos en hardware clásico                  | validación inicial de algoritmos        |
| <b>Hardware cuántico NISQ</b> | Computadoras cuánticas actuales con número limitado de qubits y ruido | experimentación en hardware real        |
| <b>Entornos híbridos</b>      | Integración de cálculo clásico y cuántico                             | algoritmos variacionales y optimización |

La posibilidad de ejecutar experimentos en múltiples entornos permite comparar el comportamiento de algoritmos en diferentes condiciones.

## 5.7 Métricas de evaluación experimental

Para evaluar los resultados de las PoCs se utilizan diversas métricas que permiten comparar el rendimiento de diferentes soluciones. Entre las métricas más relevantes destacan:

| Métrica                       | Descripción                                |
|-------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>Calidad de la solución</b> | Cercanía de la solución obtenida al óptimo |
| <b>Tiempo de ejecución</b>    | Tiempo necesario para obtener una solución |

|                                         |                                                             |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <b>Escalabilidad</b>                    | Capacidad de abordar problemas de mayor tamaño              |
| <b>Consumo computacional</b>            | Recursos computacionales utilizados                         |
| <b>Robustez</b>                         | Sensibilidad a ruido o variaciones de parámetros            |
| <b>Comparación con métodos clásicos</b> | Diferencia de rendimiento frente a algoritmos tradicionales |

Estas métricas permiten evaluar de forma objetiva el comportamiento de algoritmos cuánticos y compararlos con soluciones clásicas.

## 5.11 Fichas estructuradas de pruebas de concepto (PoC)

Cada ficha de PoC recoge información técnica y experimental organizada en diferentes bloques. Esta estructura permite documentar de forma clara los elementos clave de cada experimento, facilitando la comparación entre diferentes aproximaciones.

| Campo                                  | Descripción                                                 |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <b>Caso de uso</b>                     | Problema empresarial o científico abordado                  |
| <b>Sector o industria</b>              | Área de aplicación del experimento                          |
| <b>Formulación matemática</b>          | Modelo computacional utilizado para representar el problema |
| <b>Algoritmo cuántico</b>              | Algoritmo implementado en la prueba de concepto             |
| <b>Algoritmo clásico de referencia</b> | Método clásico utilizado como baseline de comparación       |
| <b>Dataset</b>                         | Datos utilizados en el experimento (reales o sintéticos)    |
| <b>Entorno de ejecución</b>            | Simulador cuántico, hardware cuántico o entorno híbrido     |
| <b>Métricas evaluadas</b>              | Métricas utilizadas para evaluar el rendimiento             |
| <b>Resultados principales</b>          | Resumen de los resultados obtenidos                         |
| <b>Conclusiones experimentales</b>     | Principales aprendizajes del experimento                    |

## 6. Benchmarking de soluciones cuánticas

### 6.1 Problema del benchmarking en computación cuántica

Uno de los principales retos en la adopción de computación cuántica consiste en evaluar de forma objetiva el rendimiento de las soluciones cuánticas en comparación con los métodos clásicos existentes.

A diferencia de otras tecnologías más maduras, la computación cuántica se encuentra actualmente en una fase de desarrollo caracterizada por:

- **hardware con capacidad limitada**, debido al número reducido de qubits disponibles, la presencia de ruido en las operaciones cuánticas y la limitada profundidad de los circuitos que pueden ejecutarse sin degradación significativa de los resultados
- **algoritmos en evolución**, donde muchas propuestas teóricas —como algoritmos variacionales o técnicas de optimización cuántica— aún se encuentran en fase de investigación y experimentación, especialmente en el contexto de hardware NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum)
- **diferentes paradigmas de computación cuántica**, incluyendo computación basada en circuitos, quantum annealing y enfoques analógicos, cada uno con capacidades y limitaciones distintas en función del tipo de problema abordado
- **ausencia de estándares industriales consolidados para evaluación de rendimiento**, lo que dificulta comparar resultados entre plataformas, algoritmos o configuraciones experimentales de forma homogénea

En este contexto, el benchmarking se convierte en un elemento fundamental para comprender el valor real que las soluciones cuánticas pueden aportar a problemas concretos.

El benchmarking permite analizar diferentes aspectos del rendimiento computacional, entre ellos:

- **calidad de las soluciones obtenidas**, evaluando la proximidad de las soluciones generadas por algoritmos cuánticos respecto a soluciones óptimas o a resultados obtenidos mediante métodos clásicos de referencia
- **eficiencia computacional**, analizando métricas como el tiempo necesario para obtener una solución, el número de iteraciones del algoritmo o la convergencia del

proceso de optimización

- **escalabilidad del algoritmo**, evaluando cómo evoluciona el rendimiento cuando aumenta el tamaño del problema, por ejemplo incrementando el número de variables, restricciones o dimensiones del espacio de búsqueda
- **consumo de recursos computacionales**, considerando factores como el número de qubits requeridos, la profundidad del circuito cuántico o el número de ejecuciones (shots) necesarias para obtener resultados estables
- **viabilidad de implementación en hardware cuántico actual**, analizando el impacto del ruido, los errores de compuerta y las limitaciones de conectividad entre qubits en la ejecución real de los algoritmos

Este tipo de análisis permite determinar en qué casos la computación cuántica puede ofrecer ventajas frente a métodos clásicos y en qué situaciones resulta más adecuado utilizar enfoques híbridos.

## 6.2 Dimensiones del benchmarking

El benchmarking de soluciones cuánticas no se limita a comparar algoritmos individuales, sino que requiere analizar múltiples dimensiones del proceso computacional.

Las principales dimensiones de evaluación incluyen:

| Dimensión                      | Descripción                                                     |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| <b>Rendimiento algorítmico</b> | Calidad de las soluciones obtenidas                             |
| <b>Tiempo de ejecución</b>     | Tiempo necesario para resolver el problema                      |
| <b>Escalabilidad</b>           | Comportamiento del algoritmo al aumentar el tamaño del problema |
| <b>Robustez</b>                | Sensibilidad a ruido o variaciones de parámetros                |
| <b>Coste computacional</b>     | Recursos necesarios para ejecutar el algoritmo                  |

Estas dimensiones permiten realizar evaluaciones más completas que simples comparaciones de tiempo de ejecución.

## 6.3 Benchmarking entre algoritmos cuánticos

Una primera dimensión del benchmarking consiste en comparar diferentes algoritmos cuánticos aplicables a un mismo problema.

En el ámbito de la optimización, por ejemplo, pueden evaluarse diferentes enfoques como:

- **algoritmos variacionales (QAOA)**, utilizados para resolver problemas de optimización combinatoria mediante circuitos cuánticos parametrizados cuyo resultado se optimiza iterativamente mediante un bucle clásico. Este enfoque se aplica, por ejemplo, a problemas de routing, asignación de recursos o scheduling.
- **quantum annealing**, basado en procesos de minimización energética de formulaciones tipo QUBO o Ising. Este paradigma resulta especialmente adecuado para ciertos problemas de optimización combinatoria y se implementa actualmente en arquitecturas especializadas como los annealers cuánticos.
- **algoritmos híbridos cuántico-clásicos**, donde parte del cálculo se realiza en hardware cuántico y parte en sistemas clásicos. Estos enfoques combinan técnicas de optimización clásica con subrutinas cuánticas y son especialmente relevantes en el contexto del hardware NISQ actual.

Cada uno de estos enfoques presenta características distintas en términos de precisión, escalabilidad y requisitos de hardware.

Un experimento típico de benchmarking puede consistir en ejecutar múltiples algoritmos sobre el mismo problema y comparar los resultados obtenidos.

Ejemplo de comparación experimental:

| Algoritmo | Paradigma computacional                   | Calidad solución (esperada)        | de   | Tiempo ejecución | de | Requisitos de hardware                            |
|-----------|-------------------------------------------|------------------------------------|------|------------------|----|---------------------------------------------------|
| QAOA      | Algoritmo variacional basado en circuitos | Alta instancias pequeñas simuladas | en o | Medio            |    | Hardware cuántico basado en circuitos o simulador |

|                                     |                                           |            |      |                                 |
|-------------------------------------|-------------------------------------------|------------|------|---------------------------------|
| <b>Quantum annealing</b>            | Optimización basada en modelos Ising/QUBO | Media      | Bajo | Annealer especializado cuántico |
| <b>Algoritmo heurístico clásico</b> | Optimización heurística clásica           | Media–alta | Bajo | Hardware clásico                |

Este tipo de análisis permite identificar qué algoritmos resultan más adecuados para diferentes tipos de problemas.

## 6.4 Benchmarking frente a soluciones clásicas

Uno de los aspectos más relevantes del benchmarking consiste en comparar soluciones cuánticas con algoritmos clásicos utilizados tradicionalmente para resolver el mismo problema.

Este análisis permite evaluar si la computación cuántica ofrece ventajas en términos de:

- **calidad de las soluciones obtenidas**, comparando la proximidad al óptimo o la calidad media de las soluciones generadas
- **eficiencia computacional**, analizando el tiempo de cálculo necesario para alcanzar una solución aceptable
- **capacidad para abordar problemas de mayor escala**, evaluando cómo se comportan los algoritmos cuando aumenta el tamaño o la complejidad del problema

En muchos casos, el objetivo no es sustituir completamente los métodos clásicos, sino identificar oportunidades donde **enfoques híbridos cuántico-clásicos puedan mejorar el rendimiento global del sistema**.

Un esquema típico de comparación incluye:

| Enfoque                         | Tipo de computación | Uso típico                                        |
|---------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------|
| <b>Algoritmo exacto clásico</b> | Computación clásica | Resolución óptima de problemas de tamaño reducido |

|                                           |                      |                                                                                 |
|-------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Algoritmo heurístico clásico</b>       | Computación clásica  | Resolución aproximada de problemas de gran escala                               |
| <b>Algoritmo cuántico</b>                 | Computación cuántica | Evaluación experimental de algoritmos cuánticos en instancias del problema      |
| <b>Algoritmo híbrido cuántico-clásico</b> | Computación híbrida  | Optimización mediante integración de subrutinas cuánticas y algoritmos clásicos |

Este tipo de benchmarking permite identificar **escenarios donde la computación cuántica puede aportar mejoras incrementales respecto a métodos clásicos**, así como determinar qué enfoques híbridos ofrecen el mejor equilibrio entre calidad de solución, coste computacional y viabilidad tecnológica en el contexto actual de hardware NISQ.

## 6.5 Benchmarking entre hardware cuántico

Otra dimensión relevante del benchmarking consiste en comparar el comportamiento de algoritmos cuánticos en diferentes plataformas de hardware.

El ecosistema actual incluye diversos proveedores de hardware cuántico basados en tecnologías físicas distintas, cada una con características técnicas que influyen directamente en el rendimiento de los algoritmos. Entre los factores más relevantes se encuentran:

- **número de qubits disponibles**, que determina el tamaño máximo de los problemas que pueden representarse en el dispositivo
- **niveles de ruido y tasas de error**, que afectan a la fidelidad de las operaciones cuánticas y a la estabilidad de los resultados
- **conectividad entre qubits**, que condiciona la complejidad de los circuitos y la necesidad de operaciones adicionales de intercambio
- **tipos de operaciones soportadas**, incluyendo el conjunto de puertas cuánticas disponibles o el modelo computacional implementado

El benchmarking entre plataformas permite analizar cómo estas características influyen en el rendimiento de los algoritmos y evaluar qué arquitecturas resultan más adecuadas para distintos tipos de problemas.

Un ejemplo simplificado de comparación entre diferentes tecnologías de hardware cuántico se muestra a continuación:

| Plataforma                      | Tecnología              | Modelo computacional            | Escala típica de qubits | Nivel de ruido |
|---------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------|
| <b>Hardware superconducting</b> | Qubits superconductores | Computación basada en circuitos | Medio                   | Moderado       |
| <b>Hardware trapped-ion</b>     | Iones atrapados         | Computación basada en circuitos | Bajo-medio              | Bajo           |
| <b>Quantum annealer</b>         | Annealing cuántico      | Optimización tipo Ising/QUBO    | Alto                    | Medio          |

Este tipo de benchmarking permite identificar **qué arquitecturas de hardware son más adecuadas para diferentes clases de algoritmos y problemas**, así como evaluar las limitaciones prácticas del hardware cuántico actual en contextos experimentales.

## 6.6 Benchmarking de impacto y eficiencia

Además de evaluar el rendimiento puramente computacional, el benchmarking también puede analizar el impacto potencial de las soluciones cuánticas en diferentes dimensiones operativas.

En particular, pueden evaluarse aspectos como:

- **reducción del consumo energético**, por ejemplo mediante optimización de redes eléctricas, planificación de generación o mejora en la gestión de la demanda energética
- **mejora en eficiencia de procesos**, evaluando cómo la optimización de decisiones operativas puede reducir tiempos de operación, pérdidas de eficiencia o costes de coordinación
- **optimización de recursos**, incluyendo la mejora en la asignación de infraestructuras, flotas, materias primas o capacidad de producción

- **impacto en sostenibilidad**, analizando cómo la optimización de sistemas complejos puede contribuir a la reducción de emisiones, uso más eficiente de recursos o mejora del rendimiento energético

Este tipo de análisis resulta especialmente relevante en el contexto de iniciativas relacionadas con:

- **transición energética**, incluyendo la optimización de redes eléctricas, integración de energías renovables y planificación de sistemas energéticos complejos
- **tecnologías climáticas**, donde la simulación de materiales o procesos químicos puede contribuir al desarrollo de tecnologías más eficientes
- **eficiencia de sistemas industriales**, mediante optimización de procesos productivos, planificación de operaciones o gestión de cadenas de suministro

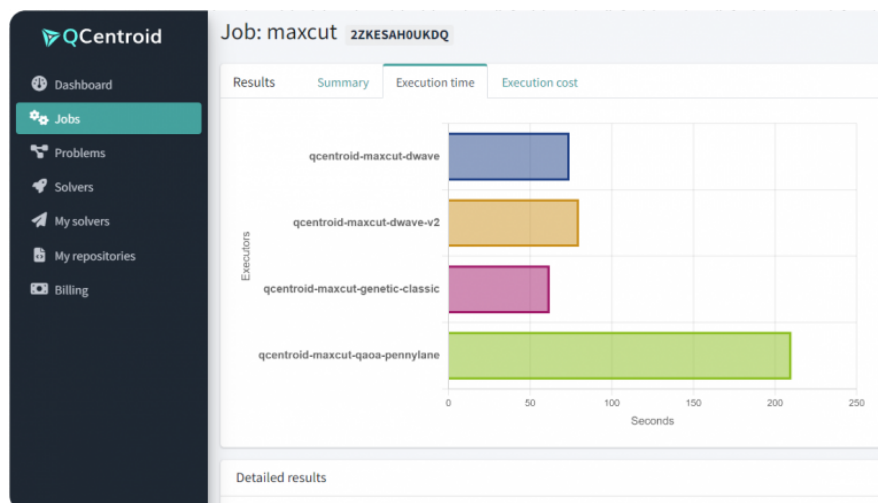
El benchmarking de impacto permite evaluar el potencial de la computación cuántica para contribuir a objetivos más amplios de eficiencia y sostenibilidad.

## 6.7 Implementación en plataforma digital

La realización de benchmarking requiere herramientas que permitan ejecutar experimentos, registrar resultados y comparar diferentes configuraciones algorítmicas y tecnológicas de forma sistemática.

En entornos de investigación y experimentación en computación cuántica, estos procesos pueden implicar la ejecución de múltiples algoritmos, configuraciones experimentales y plataformas de hardware, lo que genera una gran cantidad de resultados que deben ser gestionados y analizados de forma estructurada.

La plataforma desarrollada por **QCentroid** integra capacidades específicas para la gestión de benchmarking dentro de su módulo **Quantum Builder**, permitiendo analizar de forma sistemática el rendimiento de soluciones cuánticas en distintos entornos computacionales.



Benchmarking de tiempos de ejecución para un caso de uso en Quantum Builder

## Ejecución agnóstica a hardware y software

Una de las características principales de la plataforma es su capacidad para realizar benchmarking de forma **agnóstica al hardware y al software utilizado**, permitiendo ejecutar algoritmos en diferentes entornos computacionales y comparar sus resultados bajo condiciones equivalentes.

Esto permite evaluar soluciones cuánticas independientemente del proveedor de hardware o del framework de desarrollo utilizado.

Entre los entornos soportados se incluyen:

- **simuladores cuánticos**, utilizados para experimentación inicial y validación de algoritmos
- **hardware cuántico NISQ**, proporcionado por diferentes proveedores tecnológicos
- **entornos híbridos cuántico-clásicos**, donde parte del cálculo se realiza en hardware clásico

Esta arquitectura permite comparar el comportamiento de algoritmos bajo diferentes configuraciones tecnológicas y evaluar el impacto de variables como el ruido del hardware, la conectividad entre qubits o la profundidad de los circuitos.

## Registro estructurado de resultados experimentales

La plataforma permite registrar de forma estructurada los resultados obtenidos durante los experimentos, incluyendo información relevante para el análisis comparativo. Entre los elementos registrados se incluyen:

- **configuraciones algorítmicas utilizadas** (*por ejemplo, número de capas en QAOA, funciones de coste o técnicas de optimización empleadas*)
- **parámetros experimentales** (*como número de iteraciones, número de ejecuciones o "shots", o parámetros variacionales del algoritmo*)
- **métricas de rendimiento obtenidas** (*por ejemplo, calidad de la solución, tiempo de ejecución o tasa de convergencia del algoritmo*)
- **plataforma de ejecución utilizada** (*simuladores cuánticos, hardware cuántico específico o entornos híbridos cuántico-clásicos*)

Este registro estructurado permite reproducir experimentos y facilitar el análisis posterior de los resultados.

### Comparación de algoritmos cuánticos y clásicos

Las herramientas de benchmarking permiten comparar soluciones cuánticas con métodos clásicos utilizados tradicionalmente para resolver el mismo problema. Esto incluye la evaluación de:

- **calidad de las soluciones obtenidas** (*proximidad al valor óptimo o calidad media de las soluciones generadas*)
- **tiempo de ejecución** (*tiempo necesario para obtener una solución o número de iteraciones requeridas*)
- **escalabilidad del algoritmo** (*comportamiento del algoritmo al aumentar el tamaño del problema o el número de variables*)
- **consumo de recursos computacionales** (*por ejemplo, número de qubits, profundidad del circuito o uso de recursos clásicos*)

Este tipo de comparación resulta fundamental para evaluar el valor potencial de la computación cuántica en aplicaciones reales.

### Benchmarking entre plataformas de hardware cuántico

La posibilidad de ejecutar experimentos en diferentes plataformas de hardware permite analizar cómo influyen las características técnicas de cada sistema en el rendimiento de los algoritmos. Entre los factores que pueden evaluarse se encuentran:

- **número de qubits disponibles** *(que determina el tamaño máximo de los problemas que pueden representarse en el dispositivo)*
- **conectividad entre qubits** *(que influye en la complejidad de los circuitos y en la necesidad de operaciones adicionales de intercambio)*
- **niveles de ruido** *(tasas de error en puertas cuánticas o en procesos de lectura de estados)*
- **profundidad máxima de circuitos** *(limitada por el ruido acumulado durante la ejecución de operaciones cuánticas)*

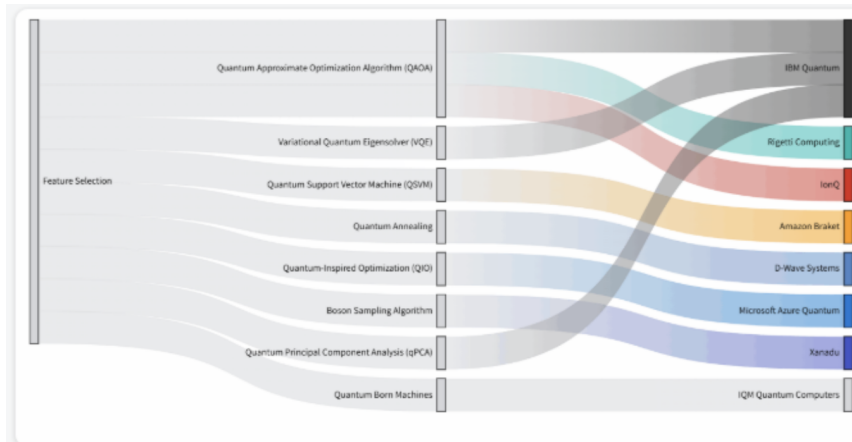
Este tipo de análisis permite identificar configuraciones tecnológicas más adecuadas para diferentes tipos de problemas.

### Repositorios de conocimiento experimental

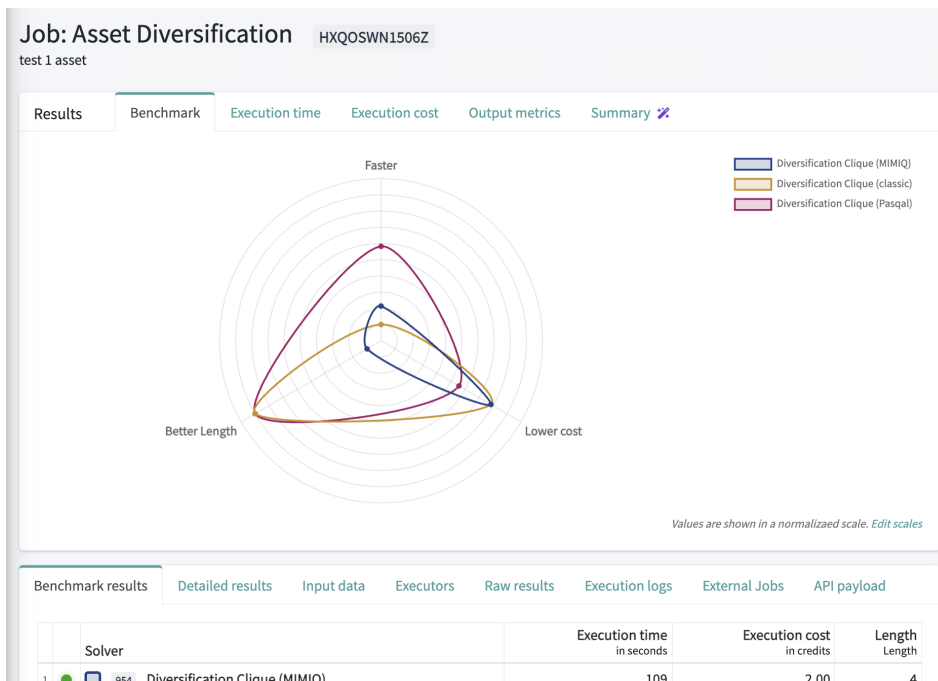
La digitalización del proceso de benchmarking permite construir repositorios de conocimiento experimental que recopilan resultados obtenidos en diferentes experimentos. Estos repositorios permiten:

- **reutilizar resultados de benchmarking en experimentos posteriores** *(por ejemplo, reutilizando configuraciones algorítmicas que han mostrado buen rendimiento)*
- **comparar nuevas formulaciones de problemas con experimentos** previos *(evaluando si cambios en el modelo o en los parámetros mejoran el rendimiento)*
- **evaluar mejoras algorítmicas o de hardware a lo largo del tiempo** *(analizando cómo evolucionan los resultados a medida que se desarrollan nuevos algoritmos o plataformas cuánticas)*

De esta manera, los resultados generados durante los procesos de experimentación se convierten en un activo de conocimiento acumulativo que facilita el avance progresivo en el desarrollo de soluciones basadas en computación cuántica.



Benchmarking de soluciones cuánticas existentes del mercado



Visualización de resultados de benchmarking para un experimento de optimización de cartera, mostrando la comparación de diferentes algoritmos en métricas como coste de ejecución, calidad de solución y tiempo de cálculo.

## 7. Privacidad en experimentación y colaboración tecnológica

### 7.1 Problema de datos en experimentación

El desarrollo de pruebas de concepto y experimentos en computación cuántica requiere habitualmente el uso de datasets que representen de forma realista los problemas que se desean modelar.

En muchos contextos empresariales, estos datos están asociados a procesos operativos críticos o contienen información sensible, lo que dificulta su utilización en entornos de experimentación tecnológica.

Entre los principales desafíos relacionados con el uso de datos en proyectos de experimentación destacan:

- **confidencialidad empresarial**, especialmente en sectores como finanzas, energía o logística, donde los datos reflejan estructuras operativas o decisiones estratégicas
- **protección de datos personales**, regulada por normativas como el Reglamento General de Protección de Datos (GDPR), que limita el tratamiento y la transferencia de información identificable
- **propiedad intelectual asociada a datasets industriales**, ya que los datos pueden constituir activos estratégicos para las organizaciones que los generan
- **restricciones para compartir información entre organizaciones**, especialmente en programas de innovación colaborativa que involucran empresas, centros de investigación y startups

Estas restricciones pueden dificultar la colaboración entre empresas, centros de investigación y startups, limitando la capacidad de desarrollar experimentos tecnológicos realistas.

En el caso específico de la computación cuántica, esta limitación resulta especialmente relevante, ya que muchos algoritmos experimentales requieren datasets estructurados que reflejen problemas reales de optimización, simulación o análisis de datos.

Para superar estas limitaciones, una de las estrategias más utilizadas consiste en el uso de **datos sintéticos**, que permiten reproducir las propiedades estadísticas de datasets reales sin revelar información sensible.

## 7.2 Mecanismos de privacidad en entornos de experimentación

Para abordar los retos asociados al uso de datos sensibles en proyectos de experimentación tecnológica, existen diferentes estrategias que permiten preservar la confidencialidad de la información sin limitar el desarrollo de pruebas de concepto.

En entornos de experimentación en computación cuántica, estas estrategias suelen agruparse en dos mecanismos principales:

| Mecanismo                                | Objetivo                                                                                                                                                            |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Datos sintéticos</b>                  | Permitir la experimentación utilizando datasets artificiales que reproducen las propiedades estadísticas de los datos reales sin exponer información sensible       |
| <b>Entornos privados de colaboración</b> | Permitir que diferentes organizaciones colaboren en proyectos de experimentación manteniendo control sobre la visibilidad de los casos de uso y los datos asociados |

Ambos mecanismos permiten reducir las barreras asociadas al acceso y compartición de datos, facilitando el desarrollo de experimentos tecnológicos en entornos colaborativos.

## 7.3 Datos sintéticos

Los datos sintéticos son conjuntos de datos generados artificialmente mediante modelos estadísticos o algoritmos de aprendizaje automático, diseñados para reproducir las características relevantes de datos reales.

A diferencia de los datos originales, los datos sintéticos no contienen información identificable sobre individuos o entidades específicas, lo que permite utilizarlos en entornos de experimentación sin comprometer la privacidad o la confidencialidad empresarial.

Las principales características de los datos sintéticos incluyen:

| Característica                               | Descripción                                                                                                                                                                                                |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Preservación de patrones estadísticos</b> | Los datos sintéticos reproducen distribuciones, correlaciones y estructuras presentes en los datos originales, permitiendo mantener propiedades relevantes para el análisis o la modelización del problema |
| <b>Protección de privacidad</b>              | Los datasets generados no contienen información identificable sobre individuos u organizaciones, reduciendo el riesgo de exposición de información sensible                                                |
| <b>Flexibilidad</b>                          | Permiten generar datasets con distintos tamaños, estructuras o niveles de complejidad, adaptados a las necesidades de experimentación                                                                      |
| <b>Reproducibilidad</b>                      | Los procesos de generación pueden replicarse mediante parámetros o semillas controladas, facilitando la repetición y validación de experimentos                                                            |
| <b>Control experimental</b>                  | Permiten modificar parámetros del dataset —como tamaño del problema, densidad de restricciones o nivel de ruido— para analizar el comportamiento de algoritmos bajo diferentes condiciones experimentales  |

Gracias a estas propiedades, los datos sintéticos permiten crear entornos de experimentación que reflejan problemas reales sin necesidad de utilizar datasets sensibles.

## 7.4 Metodologías de generación

Existen diferentes enfoques para la generación de datos sintéticos, que pueden aplicarse dependiendo del tipo de problema y de la estructura del dataset original. De forma general, las metodologías de generación pueden agruparse en tres categorías principales.

### Modelos estadísticos

Una de las aproximaciones más simples consiste en generar datos sintéticos utilizando modelos estadísticos que replican las distribuciones observadas en los datos reales.

Este enfoque suele utilizarse cuando los datos presentan estructuras relativamente simples.

Ejemplos incluyen:

- **generación basada en distribuciones probabilísticas**, donde las variables se generan siguiendo distribuciones estimadas a partir de datos reales
- **modelos de regresión**, que permiten reproducir relaciones entre variables mediante modelos estadísticos
- **simulaciones estocásticas**, utilizadas para generar observaciones mediante procesos aleatorios controlados

### Modelos basados en aprendizaje automático

En datasets más complejos, los datos sintéticos pueden generarse mediante modelos de aprendizaje automático capaces de capturar relaciones más complejas entre variables.

Entre los enfoques más utilizados se encuentran:

| Método                                        | Descripción                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>GANs (Generative Adversarial Networks)</b> | Redes neuronales que generan datos realistas mediante un proceso de aprendizaje adversarial entre un modelo generador y un modelo discriminador |
| <b>Variational Autoencoders (VAE)</b>         | Modelos generativos probabilísticos que aprenden una representación latente del dataset y permiten generar nuevas muestras                      |
| <b>Modelos generativos probabilísticos</b>    | Modelos estadísticos avanzados que capturan la estructura probabilística conjunta de los datos                                                  |

Estos enfoques permiten generar datasets sintéticos que mantienen estructuras complejas presentes en los datos originales.

### Simulación basada en modelos

En algunos casos, especialmente en problemas de optimización o simulación industrial, los datos pueden generarse mediante modelos que simulan directamente el comportamiento de un sistema. Por ejemplo:

- **simulación de redes logísticas**, generando instancias de rutas, demanda o flujos de transporte
- **simulación de sistemas energéticos**, modelando generación, consumo y distribución de energía
- **generación de instancias de problemas de optimización**, como grafos, matrices de costes o restricciones operativas

Este enfoque resulta especialmente útil cuando el objetivo es generar datasets para evaluar algoritmos en múltiples escenarios.

## 7.5 Aplicación en experimentación cuántica

El uso de datos sintéticos resulta especialmente relevante en el contexto de la experimentación en computación cuántica.

Muchos experimentos requieren datasets que permitan modelar problemas complejos, como por ejemplo:

- **optimización de redes logísticas**, incluyendo planificación de rutas, asignación de flotas o diseño de redes de distribución
- **planificación y asignación de recursos**, en problemas de scheduling, gestión de capacidad o planificación de producción
- **análisis de datos financieros**, como optimización de carteras o simulaciones de escenarios de riesgo
- **modelización de sistemas energéticos**, incluyendo optimización de redes eléctricas o planificación de generación y consumo

En estos contextos, los datos sintéticos permiten generar instancias realistas del problema sin utilizar datos empresariales sensibles.

Las ventajas de utilizar datos sintéticos en experimentación cuántica incluyen:

- **facilitar la colaboración entre diferentes actores del ecosistema**, como empresas, centros de investigación y startups

- **permitir la publicación y replicación de experimentos**, favoreciendo la validación independiente de resultados
- **generar datasets de distintos tamaños y niveles de complejidad**, lo que permite analizar la escalabilidad de los algoritmos
- **acelerar el desarrollo de pruebas de concepto**, reduciendo las barreras asociadas al acceso a datos operativos reales

Además, la generación de datos sintéticos permite **explorar diferentes configuraciones del problema**, modificando parámetros como el tamaño del sistema, la estructura de las restricciones o la distribución de los datos. Esto resulta especialmente útil para evaluar el comportamiento de algoritmos cuánticos bajo distintos escenarios experimentales y analizar su rendimiento en diferentes condiciones de aplicación.

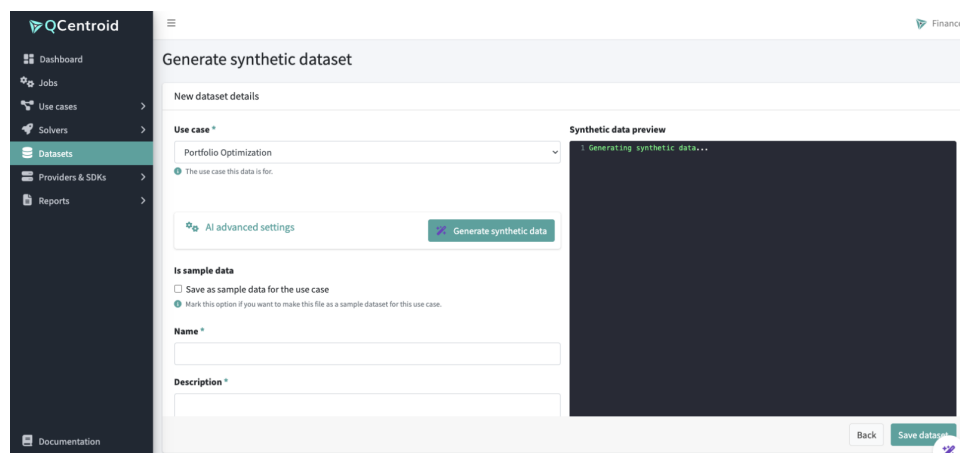
## 7.6 Implementación en plataforma digital

Las herramientas de generación y gestión de datos sintéticos pueden integrarse dentro de plataformas de experimentación tecnológica para facilitar el desarrollo de pruebas de concepto.

En el caso de la plataforma **QCentroid**, estas capacidades se integran dentro de los entornos de experimentación utilizados para el desarrollo de algoritmos y benchmarking. La plataforma permite:

- **generar datasets sintéticos estructurados** para problemas de optimización, simulación o análisis de datos
- **utilizar datasets sintéticos en experimentos cuánticos**, integrándolos directamente en los flujos de ejecución de algoritmos
- **compartir datasets entre distintos proyectos de experimentación**, facilitando la reutilización de escenarios experimentales
- **preservar la confidencialidad de los datos**, permitiendo realizar experimentos sin necesidad de utilizar información empresarial sensible

Este enfoque permite crear entornos de experimentación donde diferentes actores del ecosistema pueden desarrollar y comparar soluciones tecnológicas sin necesidad de acceder a datos empresariales sensibles.



Generación de datasets en experimentación en plataforma

## 7.7 Entornos privados de colaboración (Hubs)

En programas de innovación tecnológica que involucran múltiples actores – empresas, centros tecnológicos, universidades o startups – resulta necesario establecer mecanismos que permitan colaborar en el desarrollo de casos de uso sin exponer información sensible a todo el ecosistema.

Una de las estrategias utilizadas consiste en estructurar la experimentación dentro de **espacios de colaboración controlados**, donde el acceso a los proyectos, datasets y resultados experimentales puede gestionarse de forma granular.

Este tipo de entornos permite definir distintos niveles de visibilidad para los participantes de un proyecto de innovación. Entre las capacidades habituales destacan:

- creación de **espacios privados de colaboración** asociados a proyectos o iniciativas concretas
- control de acceso a casos de uso específicos
- compartición selectiva de datasets o resultados experimentales
- gestión de permisos para diferentes tipos de participantes

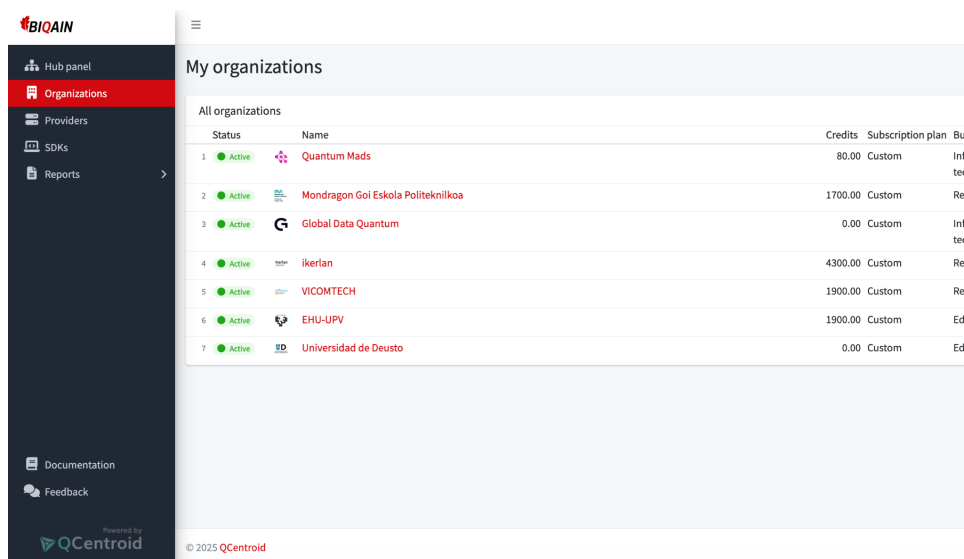
Este enfoque permite combinar **colaboración abierta dentro del ecosistema** con mecanismos de protección de la información estratégica de las organizaciones participantes.

## Implementación en plataforma digital

La plataforma desarrollada por **QCentroid** integra estas capacidades dentro de su módulo **Hub OS**, que permite gestionar programas de experimentación tecnológica y colaboración entre distintos actores del ecosistema cuántico.

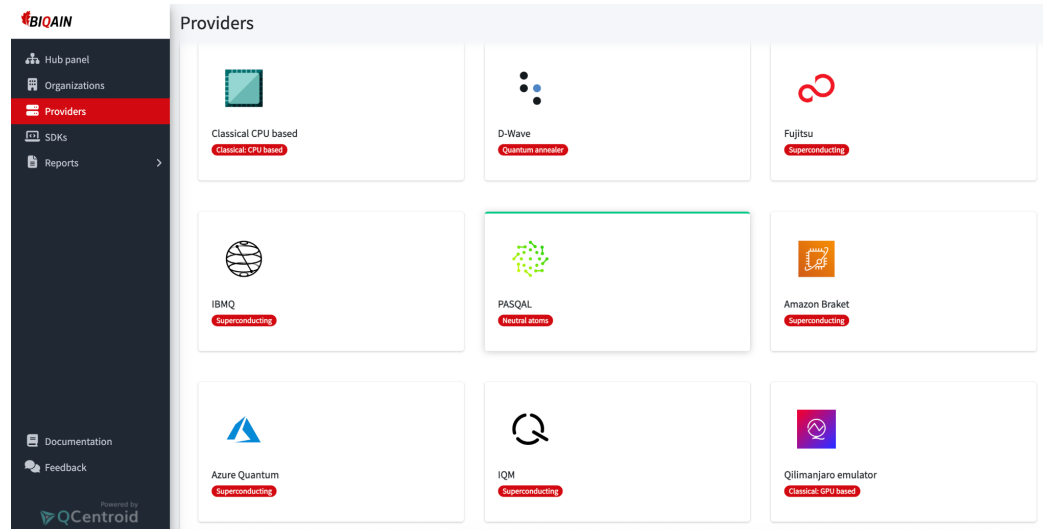
Dentro de estos hubs es posible:

- crear espacios de experimentación asociados a organizaciones concretas
- restringir la visibilidad de casos de uso a determinados participantes
- compartir datasets o resultados experimentales únicamente con grupos específicos
- gestionar programas de innovación abierta y retos tecnológicos

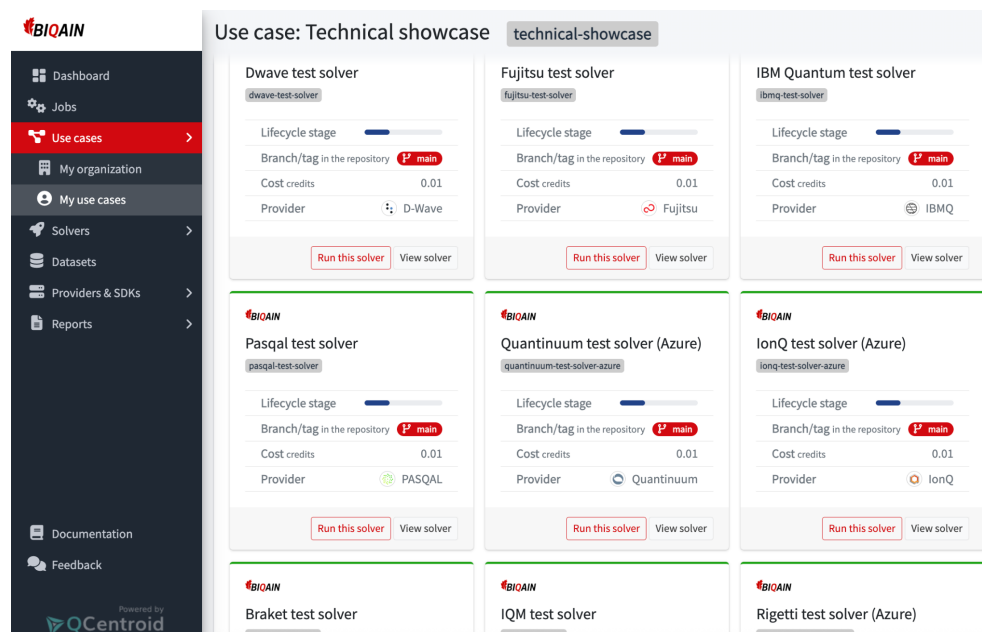


| Status   | Name                              | Credits | Subscription plan | Busi      |
|----------|-----------------------------------|---------|-------------------|-----------|
| 1 Active | Quantum Mads                      | 80.00   | Custom            | Info-tech |
| 2 Active | Mondragon Goi Eskola Politeknikoa | 1700.00 | Custom            | Rese      |
| 3 Active | Global Data Quantum               | 0.00    | Custom            | Info-tech |
| 4 Active | Ikerlan                           | 4300.00 | Custom            | Rese      |
| 5 Active | VICOMTECH                         | 1900.00 | Custom            | Rese      |
| 6 Active | EHU-UPV                           | 1900.00 | Custom            | Edu       |
| 7 Active | Universidad de Deusto             | 0.00    | Custom            | Edu       |

Interfaz de administración de organizaciones y participantes dentro del ecosistema, facilitando la gestión de actores involucrados en proyectos de experimentación tecnológica.



Panel de gestión de proveedores de computación cuántica dentro de la plataforma, que permite seleccionar y acceder a diferentes entornos de ejecución para experimentación.



Catálogo de solvers y algoritmos disponibles para la ejecución de casos de uso, permitiendo comparar diferentes aproximaciones algorítmicas en un mismo problema.

Este enfoque permite estructurar entornos de colaboración seguros donde diferentes organizaciones pueden desarrollar pruebas de concepto y experimentos tecnológicos manteniendo el control sobre la información compartida

## 8. Computación cuántica aplicada a machine learning

### 8.1 Contexto y motivación

El desarrollo de modelos de machine learning se ha convertido en uno de los principales motores de innovación tecnológica en múltiples sectores industriales. Sin embargo, el entrenamiento y optimización de estos modelos puede implicar costes computacionales elevados, especialmente en problemas que requieren la exploración de espacios de soluciones muy amplios.

En este contexto, la computación cuántica ha despertado un creciente interés como posible herramienta para mejorar ciertos procesos asociados al aprendizaje automático, especialmente en áreas como:

- **optimización de funciones objetivo complejas**, donde los algoritmos cuánticos podrían explorar espacios de soluciones de forma diferente a los métodos clásicos
- **exploración de espacios de parámetros de alta dimensionalidad**, presentes en el entrenamiento de modelos avanzados
- **aceleración de ciertos subprocesos computacionales**, como el cálculo de kernels o la optimización de parámetros

Aunque muchas de estas aplicaciones se encuentran todavía en fases tempranas de investigación, existe un creciente número de algoritmos que exploran **arquitecturas híbridas cuántico-clásicas**, donde circuitos cuánticos se integran dentro de procesos de aprendizaje automático clásicos.

Este tipo de enfoques permite **experimentar con nuevas estructuras algorítmicas**, aunque la evidencia empírica sobre ventajas prácticas aún se encuentra en desarrollo

### 8.2 Algoritmos de quantum machine learning

El campo de **quantum machine learning (QML)** incluye diferentes enfoques algorítmicos que exploran la integración de circuitos cuánticos dentro de procesos de aprendizaje automático.

Entre los enfoques más estudiados destacan:

| Tipo de algoritmo                          |               | Aplicación principal     | Descripción                                                                                |
|--------------------------------------------|---------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Variational Quantum Circuits</b>        |               | Clasificación, regresión | Circuitos cuánticos parametrizados entrenados mediante optimización clásica                |
| <b>Quantum methods</b>                     | <b>kernel</b> | Clasificación            | Uso de kernels cuánticos para mapear datos a espacios de características de alta dimensión |
| <b>Quantum networks</b>                    | <b>neural</b> | Modelos híbridos         | Redes que incorporan circuitos cuánticos como capas del modelo                             |
| <b>Algoritmos de optimización cuántica</b> |               | Entrenamiento de modelos | Uso de algoritmos cuánticos para optimizar funciones objetivo                              |

En muchos casos, estos algoritmos se implementan dentro de **arquitecturas híbridas**, donde el entrenamiento del modelo combina pasos clásicos con evaluaciones realizadas mediante circuitos cuánticos.

### 8.3 Optimización del entrenamiento de modelos

Una de las áreas donde la computación cuántica podría ofrecer mayor potencial consiste en la **optimización de procesos asociados al entrenamiento de modelos de machine learning**.

Entre los aspectos que pueden explorarse destacan:

- **optimización de hiperparámetros**, como tasas de aprendizaje, arquitectura del modelo o regularización
- **optimización de funciones objetivo complejas**, presentes en modelos no convexos o de alta dimensionalidad
- **exploración eficiente de espacios de soluciones**, especialmente en problemas con múltiples óptimos locales

En este contexto, algoritmos cuánticos de optimización pueden utilizarse para mejorar ciertos procesos que tradicionalmente se resuelven mediante **métodos heurísticos o aproximaciones iterativas**.

Este tipo de enfoques resulta especialmente relevante en problemas donde la **dimensionalidad del espacio de búsqueda es elevada**, lo que dificulta la exploración mediante métodos clásicos.

## 8.4 Reducción del coste computacional y consumo energético

Otra motivación relevante para explorar la aplicación de computación cuántica en machine learning consiste en la posibilidad de mejorar la eficiencia computacional de determinados procesos.

El entrenamiento de modelos avanzados puede requerir grandes cantidades de recursos computacionales, incluyendo:

- **potencia de cálculo**, especialmente en el entrenamiento de modelos de gran escala
- **memoria**, necesaria para almacenar grandes volúmenes de datos o parámetros del modelo
- **consumo energético**, asociado al uso intensivo de infraestructuras de computación de alto rendimiento

La investigación en algoritmos cuánticos busca explorar si ciertas operaciones computacionales pueden realizarse de forma más eficiente mediante circuitos cuánticos, especialmente en tareas que implican exploración de espacios de soluciones complejos.

Aunque estas ventajas aún están en fase de investigación, la experimentación con algoritmos de quantum machine learning permite evaluar su potencial en diferentes escenarios.

## 8.5 Experimentación en entornos híbridos

La mayoría de los enfoques actuales de quantum machine learning se desarrollan mediante **arquitecturas híbridas cuántico-clásicas**, donde el proceso de entrenamiento combina diferentes tipos de recursos computacionales.

En estos entornos, el flujo de entrenamiento puede incluir:

1. **procesamiento de datos en hardware clásico**, incluyendo preprocesamiento y preparación de datos

2. **evaluación de circuitos cuánticos**, utilizados como parte del modelo o como subrutinas dentro del proceso de optimización
3. **optimización de parámetros mediante algoritmos clásicos**, que ajustan los parámetros de los circuitos cuánticos

Este enfoque permite aprovechar las capacidades actuales del hardware cuántico **sin sustituir completamente las infraestructuras clásicas existentes**, lo que resulta especialmente relevante en el contexto del hardware NISQ.

## 8.6 Implementación en plataforma digital

La experimentación con algoritmos de quantum machine learning requiere herramientas que permitan **integrar entornos de desarrollo de machine learning con frameworks de programación cuántica**.

La plataforma desarrollada por **QCentroid** permite integrar experimentos de machine learning dentro de los entornos de experimentación utilizados para el desarrollo y evaluación de algoritmos cuánticos.

Estas herramientas permiten:

- **implementar algoritmos híbridos cuántico-clásicos**, integrando circuitos cuánticos dentro de pipelines de entrenamiento
- **ejecutar experimentos en simuladores o hardware cuántico**, facilitando la evaluación de diferentes configuraciones experimentales
- **registrar métricas de rendimiento y eficiencia computacional**, incluyendo calidad del modelo o coste de entrenamiento
- **comparar resultados con modelos clásicos de referencia**, permitiendo analizar el valor potencial de los enfoques cuánticos

Este enfoque permite analizar de forma estructurada **el potencial de la computación cuántica para mejorar determinados procesos asociados al aprendizaje automático**.



## Ejemplo de caso de uso basado en técnicas de ML mejoradas con algoritmia cuántica

## 9. Gestión de propiedad intelectual y activos de innovación en computación cuántica

Los procesos de exploración tecnológica y experimentación asociados a la computación cuántica generan diversos activos intangibles, que pueden constituir elementos de valor para las organizaciones participantes en programas de innovación.

En este contexto, la gestión de propiedad intelectual no se limita únicamente a mecanismos formales como patentes, sino que incluye la documentación, organización y trazabilidad de los activos de conocimiento generados durante los procesos de experimentación.

La estructuración adecuada de estos activos permite facilitar su reutilización, transferencia tecnológica y posible explotación futura dentro de proyectos de investigación, desarrollo o innovación industrial.

### 9.1 Activos generados en experimentación cuántica

Durante los ciclos de descubrimiento, priorización y experimentación descritos en las secciones anteriores, pueden generarse diferentes tipos de activos tecnológicos y de conocimiento. La identificación y documentación de estos activos permite estructurar el conocimiento generado durante el desarrollo de proyectos de innovación tecnológica.

Entre los principales activos que pueden surgir en este tipo de procesos se encuentran:

| Tipo de activo                   | Descripción                                                                                   |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Casos de uso</b>              | Problemas industriales o científicos identificados para la aplicación de computación cuántica |
| <b>Formulaciones matemáticas</b> | Modelos que representan el problema en términos computacionales                               |
| <b>Algoritmos</b>                | Implementaciones de algoritmos cuánticos o híbridos cuántico-clásicos                         |
| <b>Experimentos</b>              | Resultados obtenidos durante pruebas de concepto o benchmarking                               |

|                                  |                                                                         |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <b>Datasets</b>                  | Conjuntos de datos utilizados en experimentación (reales o sintéticos)  |
| <b>Conocimiento metodológico</b> | Aprendizajes derivados de la experimentación y evaluación de soluciones |

## 9.2 Documentación estructurada de activos

Para facilitar la gestión de los activos generados durante los procesos de experimentación, resulta útil utilizar **plantillas estructuradas de documentación** que permitan registrar la información relevante asociada a cada activo. Estas plantillas pueden incluir información como:

| Campo                     | Descripción                                 |
|---------------------------|---------------------------------------------|
| Caso de uso               | Problema o aplicación tecnológica           |
| Organización originadora  | Entidad que propone el caso de uso          |
| Sector o industria        | Área de aplicación                          |
| Formulación computacional | Modelo matemático del problema              |
| Algoritmo utilizado       | Algoritmo cuántico o clásico aplicado       |
| Entorno de ejecución      | Simulador o hardware utilizado              |
| Resultados experimentales | Resultados obtenidos en pruebas de concepto |
| Estado de desarrollo      | Exploración, PoC, validación o desarrollo   |

## 9.3 Gestión de contribuciones en ecosistemas colaborativos

Los programas de experimentación tecnológica en computación cuántica suelen implicar la participación de múltiples actores del ecosistema, como empresas, centros tecnológicos, universidades o startups.

En estos contextos resulta relevante mantener mecanismos que permitan identificar las contribuciones realizadas por cada participante en el desarrollo de soluciones tecnológicas.

Entre los aspectos que pueden registrarse destacan:

- organizaciones que proponen casos de uso
- organizaciones que desarrollan algoritmos o modelos computacionales
- entidades que participan en la ejecución de experimentos
- contribuciones en datasets o formulaciones del problema

La trazabilidad de estas contribuciones facilita la gestión de los activos generados y permite establecer mecanismos claros de reconocimiento de la participación de cada actor.

Este enfoque resulta especialmente relevante en entornos de colaboración estructurados mediante hubs de innovación, donde diferentes organizaciones pueden participar en proyectos de experimentación con distintos niveles de acceso y visibilidad.

## 9.4 Potencial de transferencia tecnológica

La documentación estructurada de los activos generados durante los procesos de experimentación permite facilitar su posible transferencia tecnológica o utilización en iniciativas posteriores.

Entre las posibles vías de aprovechamiento de estos activos se encuentran:

- desarrollo de proyectos de investigación aplicada
- colaboración tecnológica entre empresas y centros de investigación
- evolución de pruebas de concepto hacia soluciones industriales
- publicación de resultados o generación de conocimiento científico

La organización sistemática de los resultados de experimentación permite que los conocimientos generados durante el desarrollo de proyectos tecnológicos puedan reutilizarse en futuras iniciativas de innovación.

## 9.5 Implementación en la plataforma digital

La gestión estructurada de los activos de innovación generados durante los procesos de experimentación puede apoyarse en plataformas digitales que permitan organizar, documentar y gestionar los distintos elementos asociados a los proyectos tecnológicos.

La plataforma desarrollada por **QCentroid** permite integrar la gestión de estos activos dentro de los entornos utilizados para el descubrimiento de casos de uso, la experimentación y el benchmarking de soluciones cuánticas.

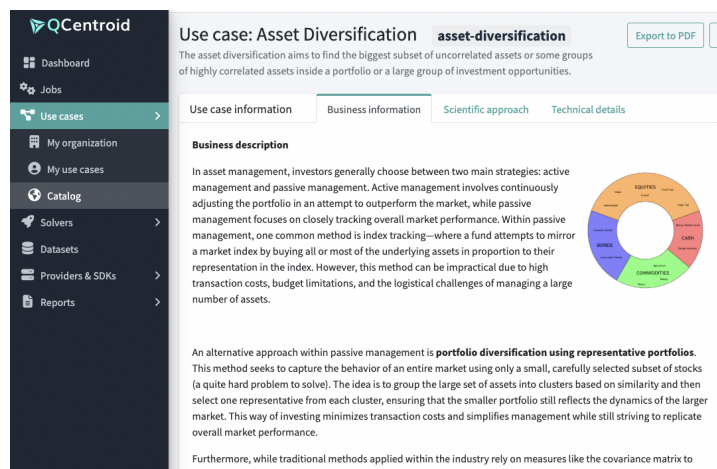
Dentro de la plataforma es posible registrar y organizar distintos tipos de activos generados durante los procesos de experimentación, como:

- casos de uso identificados durante la fase de descubrimiento
- implementaciones algorítmicas utilizadas en pruebas de concepto
- experimentos ejecutados y resultados obtenidos
- datasets utilizados en los experimentos
- documentación asociada a cada proyecto o iniciativa

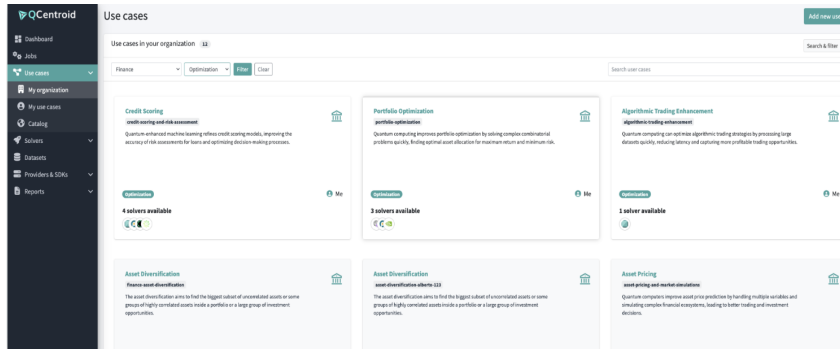
Estos elementos pueden organizarse dentro de repositorios estructurados asociados a proyectos, hubs o programas de experimentación.

La plataforma permite además mantener trazabilidad entre los distintos elementos del proceso de innovación, conectando:

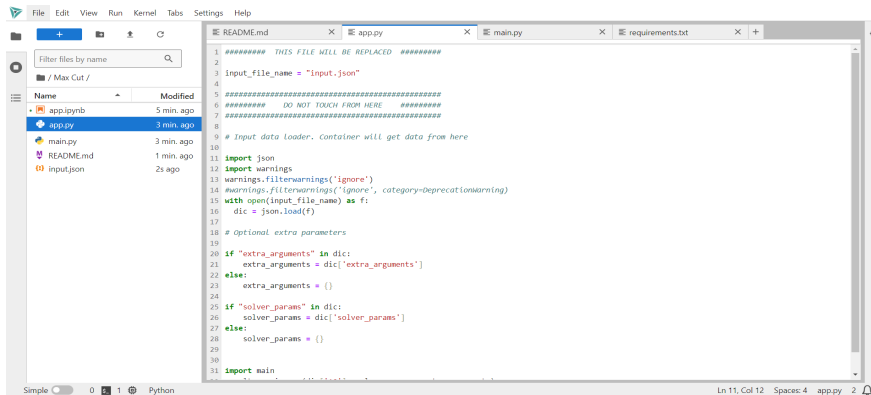
- casos de uso identificados
- experimentos realizados
- algoritmos utilizados
- resultados obtenidos



Activo - Caso de uso (Descripción de negocio)



Activo - Catálogo de casos de uso dentro de la organización



Activo - Solvers e implementación técnica en IDE de QCentroid

Este enfoque facilita la gestión del conocimiento generado durante los procesos de experimentación y permite reutilizar los activos tecnológicos desarrollados en futuras iniciativas de investigación o innovación.