



# Índice

Definición del Problema

Computación Cuántica

Formulación Matemática

Resultados

Conclusión

# Índice

Definición del Problema

Computación Cuántica

Formulación Matemática

Resultados

Conclusión

# Optimización de Cadenas de Servicios

Con las redes 5G surge la posibilidad de desacoplar funciones de red del hardware y servir estas mismas mediante software, en lo que se conoce como Funciones Virtuales de Red (VNFs), aumentando la conectividad y escalabilidad.

# Optimización de Cadenas de Servicios

El objetivo será establecer la ruta óptima entre un nodo inicial y final que sea capaz de obtener las Funciones Virtuales de Red solicitadas.

# Optimización de Cadenas de Servicios

El objetivo será establecer la ruta óptima entre un nodo inicial y final que sea capaz de obtener las Funciones Virtuales de Red solicitadas. Para ello se deberá tener en cuenta:

- ▶ La **función de coste** a minimizar, en este caso el número de saltos.

# Optimización de Cadenas de Servicios

El objetivo será establecer la ruta óptima entre un nodo inicial y final que sea capaz de obtener las Funciones Virtuales de Red solicitadas. Para ello se deberá tener en cuenta:

- ▶ La **función de coste** a minimizar, en este caso el número de saltos.
- ▶ Los **recursos** de cada nodo.

# Optimización de Cadenas de Servicios

El objetivo será establecer la ruta óptima entre un nodo inicial y final que sea capaz de obtener las Funciones Virtuales de Red solicitadas. Para ello se deberá tener en cuenta:

- ▶ La **función de coste** a minimizar, en este caso el número de saltos.
- ▶ Los **recursos** de cada nodo.
- ▶ El **ancho de banda** disponible de cada enlace.



# Optimización de Cadenas de Servicios

El objetivo será establecer la ruta óptima entre un nodo inicial y final que sea capaz de obtener las Funciones Virtuales de Red solicitadas. Para ello se deberá tener en cuenta:

- ▶ La **función de coste** a minimizar, en este caso el número de saltos.
- ▶ Los **recursos** de cada nodo.
- ▶ El **ancho de banda** disponible de cada enlace.
- ▶ Las **funciones** solicitadas.

# Optimización de Cadenas de Servicios

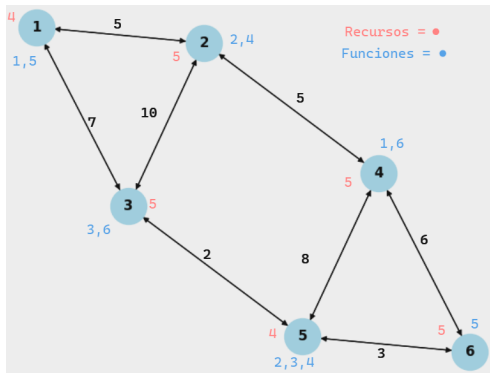


Figura: Representación gráfica de una red de 6 nodos.

# Índice

Definición del Problema

Computación Cuántica

Formulación Matemática

Resultados

Conclusión

# Computación Cuántica

La computación cuántica es un nuevo paradigma de la computación que hace uso de la mecánica cuántica para resolver problemas extremadamente complejos y costosos para el enfoque clásico.

# Computación Cuántica

Las principales características de esta tecnología son:

# Computación Cuántica

Las principales características de esta tecnología son:

- ▶ El **qubit**: Equivalentes al bit, es una superposición de 1 y 0 en proporción variable. Es posible gracias a la superposición cuántica.

# Computación Cuántica

Las principales características de esta tecnología son:

- ▶ El **qubit**: Equivalentes al bit, es una superposición de 1 y 0 en proporción variable. Es posible gracias a la superposición cuántica.
- ▶ El **entrelazamiento cuántico**: Propiedad que permite relacionar varios qubits entre sí.

# Computación Cuántica

Las principales características de esta tecnología son:

- ▶ El **qubit**: Equivalentes al bit, es una superposición de 1 y 0 en proporción variable. Es posible gracias a la superposición cuántica.
- ▶ El **entrelazamiento cuántico**: Propiedad que permite relacionar varios qubits entre sí.

La capacidad de manejar información y procesarla es altísima.



# Computación Cuántica Adiabática

Es una vertiente de la computación cuántica en la que las soluciones generadas son valoradas por su **energía**<sup>1</sup>. Se fundamenta en el teorema adiabático de la mecánica cuántica.

---

<sup>1</sup>Rajak, A., Suzuki, S., Dutta, A. and Chakrabarti, B. K. (2023). Quantum annealing: An overview. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 381(2241), 20210417.

# Computación Cuántica Adiabática

Es una vertiente de la computación cuántica en la que las soluciones generadas son valoradas por su **energía**<sup>1</sup>. Se fundamenta en el teorema adiabático de la mecánica cuántica.

- ▶ **(1)** Se codifica el problema en un sistema cuántico.

---

<sup>1</sup>Rajak, A., Suzuki, S., Dutta, A. and Chakrabarti, B. K. (2023). Quantum annealing: An overview. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 381(2241), 20210417.

# Computación Cuántica Adiabática

Es una vertiente de la computación cuántica en la que las soluciones generadas son valoradas por su **energía**<sup>1</sup>. Se fundamenta en el teorema adiabático de la mecánica cuántica.

- ▶ **(1)** Se codifica el problema en un sistema cuántico.
- ▶ **(2)** Se transforma el sistema lentamente hasta llegar al nivel de energía mínimo (solución óptima).

---

<sup>1</sup>Rajak, A., Suzuki, S., Dutta, A. and Chakrabarti, B. K. (2023). Quantum annealing: An overview. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 381(2241), 20210417.

# Computación Cuántica Adiabática

De forma simplificada, se traduce el problema a un sistema al cual se le aplicarán una serie de transformaciones y se medirá su energía.

# Computación Cuántica Adiabática

De forma simplificada, se traduce el problema a un sistema al cual se le aplicarán una serie de transformaciones y se medirá su energía.

Menor energía → Mejor solución

# Computación Cuántica Adiabática

Esta será la tecnología aplicada para resolver el problema en cuestión gracias a la plataforma D-Wave Leap <sup>2</sup>.



**Figura:** Computadores cuánticos adiabáticos de D-Wave.

---

<sup>2</sup>D-Wave System Documentation.

<https://docs.dwavesys.com/docs/latest/index.html>

# Índice

Definición del Problema

Computación Cuántica

**Formulación Matemática**

Resultados

Conclusión

# Formulación Matemática

Formular el problema y sus restricciones a un modelo **QUBO**<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup>Glover, F., Kochenberger, G., Hennig, R. and Du, Y. (2022). Quantum bridge analytics I: a tutorial on formulating and using QUBO models. *Annals of Operations Research*, 314(1), 141-183.



# Formulación Matemática

Formular el problema y sus restricciones a un modelo **QUBO**<sup>3</sup>.

**Q**uadratic **U**nconstrained **B**inary **O**ptimization

---

<sup>3</sup>Glover, F., Kochenberger, G., Hennig, R. and Du, Y. (2022). Quantum bridge analytics I: a tutorial on formulating and using QUBO models. Annals of Operations Research, 314(1), 141-183.

# Formulación Matemática

Formular el problema y sus restricciones a un modelo **QUBO**<sup>3</sup>.

**Q**uadratic **U**nconstrained **B**inary **O**ptimization

Esta expresión tendrá la forma:

$$QUBO = \alpha_1 * CostFunction + \alpha_2 * Constrain_1 + \alpha_3 * Constrain_2 \dots$$

---

<sup>3</sup>Glover, F., Kochenberger, G., Hennig, R. and Du, Y. (2022). Quantum bridge analytics I: a tutorial on formulating and using QUBO models. Annals of Operations Research, 314(1), 141-183.

# Construyendo un QUBO

La función de coste será el número de saltos posibles.

$$\textit{CostFunction} = \sum_{a=1}^A \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{i,j,a}$$

# Construyendo un QUBO

La función de coste será el número de saltos posibles.

$$CostFunction = \sum_{a=1}^A \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{i,j,a}$$

- Donde  $i, j, a$  corresponderá al nodo inicial, final y agente respectivamente.

# Construyendo un QUBO

Restricción para asegurar que del nodo inicial solo se sale.  
Matemáticamente:

$$\forall a \in \{1, 2, \dots, A\}, \sum_{j=1}^N x_{InitialNode, j, a} = 1$$

# Construyendo un QUBO

Restricción para asegurar que del nodo inicial solo se sale.  
Matemáticamente:

$$\forall a \in \{1, 2, \dots, A\}, \sum_{j=1}^N x_{InitialNode,j,a} = 1$$

Luego:

$$Constrain_1 = \sum_{a=1}^A \left( \sum_{j=1}^N x_{InitialNode,j,a} - 1 \right)^2$$

# Índice

Definición del Problema

Computación Cuántica

Formulación Matemática

**Resultados**

Conclusión

# Resultados

Con el polinomio creado, ejecutaremos en primera instancia el simulador y después el solver híbrido.



# Resultados

Con el polinomio creado, ejecutaremos en primera instancia el simulador y después el solver híbrido.

- ▶ El **simulador** será una librería que emula el comportamiento de un computador cuántico. Se utilizará en la fase inicial del desarrollo.

# Resultados

Con el polinomio creado, ejecutaremos en primera instancia el simulador y después el solver híbrido.

- ▶ El **simulador** será una librería que emula el comportamiento de un computador cuántico. Se utilizará en la fase inicial del desarrollo.
- ▶ El **solver híbrido** es una implementación de un algoritmo especialmente diseñado para trabajar con una unidad de procesamiento cuántico en las partes más complejas del problema, y un ordenador clásico a modo de postprocesado.

# Interpretando los resultados

La solución se expresará gráficamente en forma de matriz:

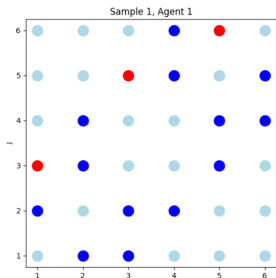


Figura: Solución para un agente.

# Interpretando los resultados

La solución se expresará gráficamente en forma de matriz:

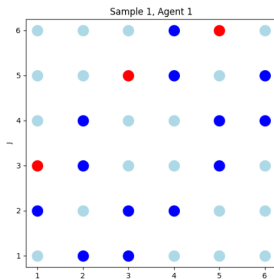


Figura: Solución para un agente.

Los tiempos empleados son consultables desde la plataforma:

**QPU\_ACCESS\_TIME**

00 h : 00 m : 00.584 s

**CHARGE\_TIME**

00 h : 00 m : 09.994 s

**RUN\_TIME**

00 h : 00 m : 09.994 s

Figura: Distribución del tiempo empleado.

# Interpretando los resultados

Los **tiempos de ejecución crecen de forma polinómica**, no exponencial. Además, si el polinomio inicial y sus ponderaciones son correctas, la **solución obtenida siempre será la óptima**.

# Índice

Definición del Problema

Computación Cuántica

Formulación Matemática

Resultados

Conclusión

# Conclusión

La computación cuántica se posiciona como una de las tecnologías más prometedoras para resolver problemas de optimización.

# Conclusión

La computación cuántica se posiciona como una de las tecnologías más prometedoras para resolver problemas de optimización. Destaca su eficiencia en problemas de gran escala y complejidad, y su habilidad para escapar mínimos locales.



# Trabajo Futuro

Como propuestas para mejorar la calidad de las soluciones:

# Trabajo Futuro

Como propuestas para mejorar la calidad de las soluciones:

- ▶ **Cálculo de constantes.** Mejorar la ponderación de cada elemento del QUBO.

# Trabajo Futuro

Como propuestas para mejorar la calidad de las soluciones:

- ▶ **Cálculo de constantes.** Mejorar la ponderación de cada elemento del QUBO.
- ▶ **Postprocesados.** Analizar el resultado obtenido en busca de posibles modificaciones a la formulación.

# Trabajo Futuro

Como propuestas para mejorar la calidad de las soluciones:

- ▶ **Cálculo de constantes.** Mejorar la ponderación de cada elemento del QUBO.
- ▶ **Postprocesados.** Analizar el resultado obtenido en busca de posibles modificaciones a la formulación.
- ▶ **División del problema.** Emplear la unidad cuántica al completo para la resolución del problema.

# Aplicación de Metaheurísticas Cuánticas para la Optimización de Cadenas de Servicios en un Modelo de Red 5G

Mario Guisado García

Universidad de Granada  
Grado en Ingeniería Informática

Tutores:

Antonio Miguel Mora García  
Alejandro Borrallo Rentero

Convocatoria Ordinaria junio 2024