



CTAG

# Aplicabilidade das técnicas de computación cuántica ó sector do automóbil

---

CTAG

[20/10/2023]



Unha maneira de facer Europa.



Fondos Europeos



Despregamento dunha infraestrutura baseada en tecnoloxías cuánticas da información que permita impulsar a I+D+i en Galicia.

*Apoiar a transición cara a una economía dixital.*

Operación financiada pola Unión Europea, a través do FONDO EUROPEO DE DESENVOLVEMENTO REXIONAL (FEDER) como parte da resposta da Unión á pandemia da COVID-19

Baixo a licencia [CC-BY-SA]

DATA	AUTOR	CAMBIOS	VERSIÓN
22/09/2023	CTAG	Análise do estado da arte, presentación e cuestionario.	Versión 1
20/10/2023	CTAG	Correccións e ampliación. Inclusión das entrevistas, discusión e conclusión.	Versión 2

# Táboa de contidos

Prefacio .....	10
1. Resumo .....	11
2. Introducción .....	13
Computadoras cuánticas universais e de propósito específico.....	13
Computadoras cuánticas universais .....	15
Computadoras cuánticas de propósito específico .....	16
Computación cuantoinspirada.....	18
Corrección de erros .....	19
Tipos de problemas.....	20
Panorama nacional.....	23
3. Estado da arte.....	25
Clases de problemas .....	25
Optimización combinatoria .....	26
Simulación cuántica.....	28
Aprendizaxe automática .....	30
Criptografía .....	31
Casos de uso.....	33
Exemplos de casos de uso postos en práctica .....	36
Volkswagen.....	37
BMW.....	41
Mercedes-Benz .....	43
Toyota.....	44
Ford.....	45
Denso.....	46
Shimizu e Mitsubishi.....	46
Hyundai.....	48
Análise da información obtida.....	50

4.	Entrevistas ó sector da automoción.....	55
	Presentación.....	55
	Cuestionario.....	70
	Resultados das entrevistas .....	72
	Discusión dos resultados .....	73
	Resumo dos casos de uso atopados.....	82
5.	Discusión .....	88
6.	Conclusión.....	93
7.	Bibliografía.....	95
	Anexo A .....	104
	Anexo B.....	109
	Anexo C .....	113
	Anexo D .....	117
	Anexo E.....	119
	Anexo F.....	121

# Lista de figuras

Figura 1.....	51
Figura 2.....	52
Figura 3.....	52
Figura 4.....	53
Figura 5.....	53
Figura 6.....	56
Figura 7.....	57
Figura 8.....	57
Figura 9.....	58
Figura 10.....	58
Figura 11.....	59
Figura 12.....	59
Figura 13.....	60
Figura 14.....	60
Figura 15.....	61
Figura 16.....	61
Figura 17.....	62
Figura 18.....	62
Figura 19.....	63
Figura 20.....	63
Figura 21.....	64
Figura 22.....	64
Figura 23.....	65
Figura 24.....	65
Figura 25.....	66
Figura 26.....	67

Figura 27.....	67
Figura 28.....	68
Figura 29.....	68
Figura 30.....	69
Figura 31.....	69
Figura 32.....	75
Figura 33.....	76
Figura 34.....	77
Figuras 35 e 36.....	80
Figura 37.....	80
Figura 38.....	80
Figuras 39 e 40.....	81
Figuras 41, 42, 43 e 44.....	82

# Lista de táboas

Táboa 1.....	37
Táboa 2.....	107
Táboa 3.....	107
Táboa 4.....	108
Táboa 5.....	108
Táboa 6.....	112
Táboa 7.....	114
Táboa 8.....	115
Táboa 9.....	115
Táboa 10.....	116
Táboa 11.....	117
Táboa 12.....	119
Táboa 13.....	121
Táboa 14.....	124
Táboa 15.....	128
Táboa 16.....	131
Táboa 17.....	135
Táboa 18.....	138
Táboa 19.....	141
Táboa 20.....	145
Táboa 21.....	148
Táboa 22.....	152
Táboa 23.....	156
Táboa 24.....	159
Táboa 25.....	163
Táboa 26.....	166

# Lista de acrónimos

- AGV** Automated Guided Vehicles
- BCG** Boston Consulting Group
- BQP** Binary Quadratic Programming
- CESGA** Centro de Supercomputación de Galicia
- CMOS** Complementary metal-oxide-semiconductor
- DA** Digital Annealer
- ECU** Electronic Central Unit
- FPGA** Field Programmable Gate Array
- GPS** Global Positioning System
- GPU** Graphics Processing Unit
- HHL** Harrow, Hassidim, and Lloyd (*Quantum algorithm for linear systems of equations*)
- HSM** Hardware Secure Module
- HPC** High Performance Computing
- HSS** Hybrid Solver Service
- LHZ** Lechner, Hauke and Zoller (unha arquitectura de *Quantum Annealing*)
- MOQEA** Multiobjective Quantum Evolutionary Algorithm
- NISQ** Noisy Intermediate-Scale Quantum (Cuántica de escala intermedia ruidosa)
- PUBO** Polinomial Unconstrained Boolean Optimization
- PVC** Policloruro de Vinilo
- QAOA** Quantum Approximate Optimization Algorithm
- QCNN** Quantum Convolutional Neural Networks
- QEA** Quantum Evolutive Algorithm (Algoritmos Cuánticos Evolutivos)
- QEC** Quantum Error Correction



- QFT** Quantum Fourier Transform (Transformada Cuántica de Fourier)
- QKD** Quantum Key Distribution
- QNN** Quantum Neural Network
- QPE** Quantum Phase Estimation
- QPU** Quantum Processing Unit
- QSAT** Quantified SAT (Boolean Satisfiability Problem)
- QUBO** Quadratic Unconstrained Binary Optimization
- QUTAC** Quantum Technology & Application Consortium
- RES** Red Española de Supercomputación
- RQAOA** Recursive QAOA
- RSA** Rivest, Shamir e Adleman (Algoritmo de ciberseguridade)
- SAT** Boolean Satisfiability Problem (Problema de Satisfacibilidade Booleana)
- SB** Simulated Bifurcation
- TBD** To Be Defined
- TSP** Traveling Salesman Problem
- VQC** Variational Quantum Classifier
- VQE** Variational Quantum Eigensolver

# Prefacio

Neste documento recóllese a investigación realizada sobre a computación cuántica no ámbito da automoción.

En primeiro lugar, preséntase un resumo onde se expón en que estado se atopa a computación cuántica.

Posteriormente, iníciase unha introdución á computación cuántica onde se explican as súas bases e as diferentes formas de computación cuántica presentes na actualidade.

Despois, no estado da arte, explícanse os tipos de problemas que se poden resolver mediante a computación cuántica. Á súa vez, expóñense os distintos casos de uso, e resúmense algúns exemplos destes problemas analizados en estudos e executados en proxectos de diferentes empresas.

Rematando, analízanse as entrevistas e a metodoloxía seguida para facelas, inclúense unha presentación, un cuestionario e as respostas dadas.

Finalmente hai dous apartados, un de discusión onde se fala dos resultados obtidos e un de conclusión a modo de peche para revisar o visto durante a investigación.

# 1. Resumo

Na actualidade, a computación cuántica converteuse nun dos campos máis prometedores da tecnoloxía, e o seu potencial impacto esténdese a diversas industrias.

A industria automotriz foi testemuña dun avance tecnolóxico significativo nas últimas décadas. Os vehículos modernos están equipados cunha variedade de sistemas e sensores que recompilan e procesan grandes cantidades de datos en tempo real. Con todo, a computación cuántica ten o potencial de revolucionar aínda máis esta industria ofrecendo solucións a problemas complexos que ata agora eran difíciles de abordar.

Os algoritmos cuánticos e cuantoinspirados teñen a capacidade de resolver moitos problemas de diversa índole relacionados coa industria da automoción, como poden ser: problemas de optimización da cadea, procesamento de imaxes, problemas de eficiencia de baterías, etc.

Actualmente, a computación cuántica encóntrase na etapa NISQ, onde as súas siglas significan *Noisy intermediate-scale quantum*, ou en galego, "Cuántica de escala intermedia ruidosa". Úsase este termo para referirse ás primeiras etapas de desenvolvemento deste tipo de computación, o que significa que a computación cuántica presenta erros e aínda non se pode usar de maneira universal. Con todo, existen solucións. Por un lado, hai algoritmos cuánticos que son susceptibles de erros e, polo tanto, pódense utilizar na era NISQ para abordar determinados problemas. Por outro lado, diferentes empresas están desenvolvendo solucións cuantoinspiradas en hardware clásico para utilizar a tecnoloxía, evitando os problemas que teñen as computadoras cuánticas a día de hoxe.

As investigacións e os avances neste campo son cada vez máis prometedores. Diversos organismos de investigación cuántica en todo o mundo están traballando para descubrir tanto novos algoritmos como aplicacións prácticas da computación cuántica que sexan relevantes para as empresas e poidan xerar beneficios significativos.

Neste documento, exploraranse as aplicacións específicas da computación cuántica na industria, especialmente da automotriz, e analizaranse os desafíos que se deberán superar para á súa implementación a gran escala.

A medida que os investigadores e as organizacións colaboran para explorar casos de uso relevantes, espérase que se descubran aplicacións prácticas deste novo tipo de computación en áreas como loxística, cadea de subministración, optimización de recursos, simulación da eficiencia de baterías e produtos químicos, intelixencia artificial e moitas outras.

## 2. Introducción

A situación actual da computación cuántica no mundo está en constante evolución. Nos últimos anos, realizáronse avances significativos no desenvolvemento e na implementación de tecnoloxías da computación cuántica. Aínda que nos atopamos nas etapas iniciais, están a construírse distintos tipos de sistemas cuánticos sofisticados.

### Computadoras cuánticas universais e de propósito específico

A comunidade científica aínda non ten claro o enfoque óptimo para construír computadoras cuánticas, con todo, existen listas de requisitos que se teñen en conta para fabricar unha. Unha das listas de requisitos que se poden tomar como referencia é a lista de David P. DiVincenzo, que nos fala de cinco puntos esenciais [1]. Unha computadora cuántica debe ter:

Un sistema físico escalable con *cúbits* ben caracterizados.

- A capacidade de iniciar o estado dos *cúbits* a un estado estándar ou de referencia simple.
- Un conxunto "universal" de portas cuánticas.
- Tempos de decoherencia prolongados e relevantes, moito máis longos que o tempo de operación das portas.
- Unha capacidade de medición específica para os *cúbits*.

Calquera sistema cuántico de dous niveis pode representar un *cúbit*. Ademais, pódense usar diferentes sistemas que representen un *cúbit* para construír un ordenador cuántico da mesma maneira que se fai na computación clásica con diferentes sistemas que representan un bit, coma un transistor que permita ou non o paso da corrente, ou o estado de magnetización dun disco duro.

Algúns dos sistemas cuánticos que se usan para a fabricación de *cúbits* son: a polarización dun fotón, o nivel de enerxía dun átomo atrapado, espines nucleares en campos magnéticos, diferentes tipos de puntos cuánticos (pequenas nanoestruturas semiconductoras) e supercondutores [2], aínda que hai outras tecnoloxías en desenvolvemento.

Dos sistemas cuánticos nomeados, o máis utilizado é o dos supercondutores. Isto é debido á gran similitude que ten coa tecnoloxía usada para a construción dos circuítos clásicos de alta velocidade e o gran coñecemento que se posúe sobre a fabricación desta tecnoloxía, amplamente utilizada nestes últimos anos.

Nestes momentos hai dous principais enfoques en desenvolvemento que cumpren os puntos de DiVincenzo: as computadoras cuánticas universais, e as computadoras cuánticas de propósito específico. Ambos os dous enfoques utilizan *cúbits* para o seu funcionamento, mais difiren no tipo de problemas que son capaces de resolver [3].

As computadoras cuánticas universais son capaces de tratar calquera problema mediante algoritmos cuánticos, non obstante, as computadoras de propósito específico son especialmente boas nun tipo concreto de problema, para o que foron construídas.

Polo xeral, cando se fala de computadoras cuánticas universais, normalmente refírese a computadoras cuánticas baseadas en portas, e cando se fala de computadoras cuánticas de propósito específico, refírese a computadoras cuánticas que buscan resolver un tipo de problema en concreto. Entre estas últimas destaca D-Wave Systems, unha empresa privada canadense que se dedica a fabricar solucións cuánticas utilizando a técnica do *quantum annealing*.

Como xa se comentara, para a construción de computadoras cuánticas, sexan universais ou de propósito específico, normalmente úsanse circuítos supercondutores, de feito, así están fabricadas as computadoras de moitas compañías pioneiras na computación cuántica como poden ser IBM [4], Google [5], Fujitsu [6], Intel [7], D-Wave [8], Bleximo [9], etc.

Tamén se construíron computadoras cuánticas baseadas noutros tipos de tecnoloxías como por exemplo de ións atrapados: IonQ [10] ou a computadora cuántica da compañía Honeywell [11].

Todas estas grandes empresas estanse centrando en mellorar e desenvolver os seus sistemas cuánticos como Google ou Intel, á mesma vez que outras tamén están a realizar diferentes investigacións con empresas doutros sectores para comezar a usar a tecnoloxía en aplicacións reais.

Algunhas empresas xa permiten utilizar parte dos seus produtos, algúns con probas de forma gratuíta ou mediante un prezo establecido. Así por exemplo IBM permite realizar cálculos coa súa plataforma Qiskit Runtime ou Fujitsu presta os seus servizos mediante o seu *digital annealer*, entre outros casos.

## Computadoras cuánticas universais

As computadoras cuánticas universais son as que se espera que teñan máis importancia no longo prazo, xa que poden implementar calquera algoritmo cuántico a través da combinación de diferentes portas cuánticas. Nestes momentos, unha parte importante do foco de estudo en computación cuántica radica en crear novos algoritmos para este tipo de computadoras.

Estas computadoras realizan unha serie de operacións lóxicas con *cúbits*, que se representan con matrices unitarias, neste caso con portas lóxicas cuánticas. As portas lóxicas cuánticas poden realizar unha transformación unitaria nun ou nun par de *cúbits* e teñen unha serie de características:

As portas cuánticas deben ser unha matriz unitaria, polo tanto, a suma das súas normas ó cadrado debe dar como resultado un:

$$|\alpha_0|^2 + |\alpha_1|^2 = 1$$

Nas portas clásicas, non se pode coñecer a porta lóxica que se usou para chegar a un resultado. Así e todo, nas portas lóxicas cuánticas si se pode desfacer esa operación, debido a que as matrices unitarias son reversibles, polo tanto, as portas cuánticas teñen inversa, e pódese realizar unha operación inversa nun algoritmo para volver a un estado anterior.

Algunhas das portas cuánticas máis importantes para un *cúbit* son [12]:

- Porta X: Equivalente á porta lóxica NOT clásica de negación.
- Porta H (ou de Hadamard): Úsase para poñer os *cúbits* en estado de superposición.
- Porta Z: Realiza un cambio de fase nos *cúbits*.

Algunhas das máis importantes para dous *cúbits* son:

- Porta Cnot (Controlled-Not): Aplica a porta X ó segundo *cúbit* se o primeiro está no estado 1. No caso contrario non realiza ningunha acción.

- Porta CU (Controlled-U): Aplica a operación U, sendo U unha porta unitaria calquera dun *cúbit*, se o primeiro *cúbit* está no estado 1. No caso contrario non realiza ningunha acción.

A porta cuántica máis importante de tres *cúbits* é:

- Porta Toffoli: Aplica a porta X ó terceiro *cúbit* só se os dous primeiros *cúbits* están no estado 1, no caso contrario non fai nada.

Ademais, na computación clásica, hai un conxunto de portas coas que se pode fabricar calquera algoritmo, sen a necesidade de usar outras, as portas universais NAND e NOR.

Igual que coas portas NAND e NOR na computación clásica, o conxunto de todas as portas dun *cúbit* sumado ó conxunto de todas as portas de dous *cúbits* é un conxunto universal, isto significa que se pode construír calquera circuío con elas.

Por outro lado, a porta de Toffoli é un conxunto universal para realizar calquera circuío clásico [13], así e todo, non é capaz de crear estados de superposición, polo que por si mesma non ten a propiedade de universalidade para construír calquera circuío cuántico. Para isto, necesita actuar cunha porta Hadamard, polo que estas dúas portas cuánticas tamén representan un conxunto universal [14].

Hoxe en día, a computadora cuántica universal con máis *cúbits* chámase Osprey, pertencendo á compañía IBM e ten 443 *cúbits*.

## Computadoras cuánticas de propósito específico

As computadoras cuánticas de propósito específico non son capaces de usar calquera algoritmo cuántico. Non obstante, hoxe en día, teñen máis *cúbits* e son máis eficientes que as universais para resolver determinados tipos de problemas. Normalmente cando se menciona este tipo de computación faise referencia á técnica do *quantum annealing*, que se usa para buscar mínimos ou máximos en problemas de optimización como poden ser o problema do viaxeiro ou o problema da mochila [15].

Este método de resolución vén da adaptación dun método clásico de optimización chamado *simulated annealing*, que, á súa vez, é unha imitación dunha técnica antiga que se leva usando miles de anos para fabricar materiais coma vidros e metais.

O *simulated annealing* baséase en aplicar regras de "escape" en simulacións por computadora para evitar que o sistema quede atrapado en mínimos locais dunha función de enerxía ou custo e, eventualmente, con certa probabilidade, chegar ó



mínimo global mediante suficientes repeticións para resolver o problema de optimización.

O *quantum annealing* baséase no *simulated annealing*. Non se utilizan portas lóxicas cuánticas, senón que se comeza construíndo un sistema cuántico simple inicializado no seu estado fundamental e despois móvese gradualmente o sistema simple cara o sistema obxectivo.

Durante o *quantum annealing*, o sistema cuántico busca a configuración de *cúbits* que minimize unha función de custo asociada ó problema de optimización. A medida que se axustan os parámetros do sistema, os *cúbits* van evolucionando para converxer cara a solución óptima, para isto aproveitan o fenómeno chamado tunelización, que non existe en computación clásica.

A tunelización é un efecto que permite que o sistema cuántico teña determinadas posibilidades de "atravesar" barreiras de enerxía, que non se poderían atravesar con computación clásica. Este fenómeno consiste en que o *cúbit* teña posibilidades de saltar un máximo dun sistema, trasladándose dun mínimo relativo a outro mínimo, que poder ser relativo ou absoluto. Ó final do algoritmo espérase que o *cúbit* estea nun mínimo absoluto, que simbolizaría o estado no que o gasto de enerxía é menor, e dá a solución ó problema inicial. Canto máis lento sexa o proceso de arrefriado da enerxía, máis probabilidade hai de atopar un mínimo absoluto [16].

Entre as computadoras que usan *quantum annealing* destacan as da empresa D-Wave Systems. Neste momento atópanse na súa quinta xeración, D-Wave Advantage, que conta con 5000 *cúbits* [17]. Esta computadora úsase para resolver problemas difíciles de combinatoria e optimización que teñen demasiadas variables como para ser resoltos nunha computadora clásica. D-Wave ten máis de 250 aplicacións industriais, o que demostra o potencial real destas máquinas en resolver problemas reais [18].

Usualmente, o *quantum annealing* úsase para resolver problemas formulados como tipo QUBO (*Quadratic Unconstrained Binary Optimization*), que son problemas de optimización no que as variables son binarias, podendo valer 0 ou 1.

Normalmente, minimizar a función obxectivo destes problemas é equivalente a minimizar un modelo de Ising. Este é un modelo que se propuxo inicialmente para estudar o comportamento de materiais ferromagnéticos, non obstante, este modelo derivou noutros que explican diversos sistemas. Ademais dos problemas tipo QUBO, o modelo Ising tamén serve para estudar moitos outros sistemas moi diversos entre si como, por exemplo, describir a dinámica de opinión dunha sociedade (modelo de

Sznajd) [19], o estudo de separación de aliaxes binarias (modelo de Kawasaki) [20] ou o estudo de segregación de poboacións (modelo de Schelling) [21].

## Computación cuantoinspirada

A computación cuantoinspirada baséase en utilizar computadoras clásicas con algoritmos clásicos que tratan de imitar un comportamento cuántico e, aproveitando este comportamento, realizar cálculos dunha forma distinta ós algoritmos totalmente clásicos.

Existen diversas investigacións dentro da computación cuantoinspirada, así e todo, a empresa máis grande que está a centrar parte dos seus esforzos nesta tecnoloxía é Fujitsu co seu *digital annealer* [22].

*Digital annealer* é unha arquitectura implementada nunha placa CMOS específica [23] e que se centra en resolver problemas tipo QUBO ou, na súa terceira xeración, problemas BQP que inclúen ós QUBO entre outros [24]. O seu funcionamento baséase en dúas aproximacións. Por un lado, un método de procura en lotes que acelera a velocidade computacional, e por outro lado, un método de procura que mellora a probabilidade de saír dun mínimo local [25].

Esta técnica inspírase na versión cuántica do *quantum annealing* para implementar algoritmos inspirados na cuántica en computadoras clásicas utilizando *bits*, para resolver problemas de combinatoria, destacando en resolver aqueles de gran tamaño rapidamente.

Actualmente pódese utilizar este servizo a través da nube, usando *software* para computadoras cuánticas (proporcionado por 1QBit) e o propio *hardware* do *digital annealer* [22].

Toshiba tamén traballou na súa tecnoloxía cuantoinspirada creando o *Simulated Bifurcation* (SB), un novo algoritmo cuantoinspirado para a optimización combinatoria [26]. O algoritmo é altamente paralelizable, así como a solución de Fujitsu vista anteriormente. Isto permite o desenvolvemento de máquinas de Ising a gran escala, do tamaño de moitos miles de *bits*. Para o seu desenvolvemento estanse utilizando FPGAs, as cales permiten procesar de forma paralela a información. Aínda que poden implementarse sobre outro tipo de hardware, como unidades de GPU, estas implementacións están aínda en desenvolvemento. Toshiba posúe un servizo baseado neste algoritmo que oferta de maneira online a través de AWS, o cal pode resolver problemas combinatorios de tamaño máximo 100000 spins [27].

## Corrección de erros

Tanto o enfoque das computadoras cuánticas universais como o enfoque das computadoras cuánticas de propósito específico posúen taxas de erro e ruído. Isto fai que sexa moi complexo obter resultados precisos destes dispositivos [28]. Para corrixir os erros necesítanse melloras de estabilidade nos *cúbits* físicos ou elaborar códigos de corrección de erros.

No ano 1995, Peter Shor logrou un avance significativo ó demostrar que é factible codificar información nun *cúbit* lóxico utilizando un estado altamente entrelazado de múltiples *cúbits* físicos [29]. Esta codificación especial proporciona protección contra erros limitados. Este proceso é unha rama de investigación moi importante para a corrección de erros cuánticos (QEC).

O campo da corrección de erros cuánticos baséase en gran medida na teoría clásica de codificación, pero existen varios problemas que deben considerarse ó transferir técnicas clásicas de corrección de erros ó réxime cuántico.

A diferenza do procesamento clásico da información, a conservación da probabilidade para estados cuánticos require que todas as operacións sexan reversibles e, polo tanto, unitarias.

Ademais, a codificación baseada na copia de datos, que se utiliza amplamente na corrección clásica de erros, non se pode utilizar debido ó teorema de non clonación da mecánica cuántica. É imposible copiar perfectamente un estado cuántico descoñecido. Isto significa que os datos cuánticos non poden protexerse de erros simplemente facendo múltiples copias.

Do mesmo modo, a medición directa non se pode utilizar para protexer eficazmente contra erros, xa que isto destruíría calquera superposición cuántica que se estea utilizando para a computación.

Polo tanto, débense empregar protocolos de corrección de erros que poidan detectar e arranxar estes fallos sen determinar ningunha información sobre o estado do *cúbit*. Ademais disto, a diferenza da información clásica, os *cúbits* son susceptíbeis tanto a erros de bit tradicionais como a erros de fase. Entón, calquera procedemento da corrección de erros debe poder emendar ambos tipos de erros simultaneamente. Finalmente os *cúbits* non experimentan cambios completos de bit ou de fase, senón un cambio angular do estado do *cúbit* por calquera ángulo.

No seu nivel máis básico, QEC utiliza a idea da codificación redundante. Isto implica que o tamaño total do espazo de Hilbert expándese máis alá do necesario para almacenar un só *cúbit* de información [30].

O problema da corrección de erros é que, segundo as estimacións actuais e utilizando os códigos de corrección de erros propostos, requírense millóns de *cúbits* físicos para obter unha cantidade significativa de *cúbits* lóxicos que se poidan usar nos algoritmos. Non obstante, é imposible na actualidade construír unha computadora cuántica con esta cantidade de *cúbits* físicos, isto obriga á industria actual a utilizar os dispositivos NISQ, que son susceptíbeis a fallos.

## Tipos de problemas

O interese da computación cuántica radica en que ten o potencial de ser moito mellor que a computación tradicional para resolver problemas de tipo NP-Completo os cales presentan unha complexidade que aumenta exponencialmente conforme aumentan o seus tamaños. Isto significa que cantas máis variables se engadan ó problema, multiplicarase exponencialmente o tempo de resolución, facendo máis difícil levar solucións óptimas de problemas deste tipo a aplicacións reais para a industria, polo menos para computadoras clásicas.

En teoría de complexidade computacional, o Problema de satisfacibilidade booleana (tamén chamado SAT) foi o primeiro problema identificado como pertencente á clase de complexidade NP-Completo en 1971 por Stephen Cook.

O problema SAT é o problema de saber se, dada unha expresión booleana con variables e sen cuantificadores, hai algunha asignación de valores para as súas variables que fai que a expresión sexa verdadeira.

A partir da identificación do problema SAT como NP-Completo, mediante reducións polinomiais do mesmo, demostrouse a pertenza de moitos outros problemas a esta categoría. Os máis famosos son os 21 problemas NP-Completo de Karp, aínda que hai moitos máis.

Tanto os 21 problemas NP-Completo de Karp como moitos outros pódense traducir a unha formulación do modelo de Ising [31]. Grazas á formulación destes problemas con este modelo, as computadoras cuánticas de propósito específico e as computadoras cuánticas universais poden resolver este tipo de problemas con diferentes algoritmos como *quantum annealing*, QAOA e VQE.

Coa súa resolución por medio destes algoritmos cuánticos, redúcese a complexidade exponencial do problema a unha complexidade polinomial, o que acorta significativamente o tempo de resolución, facéndoos teoricamente computables para aplicacións industriais.

A continuación, expóñense unha serie de problemas que pertencen á lista de Karp e ademais son a base de diversos retos de optimización da industria actual. Estes problemas contan cunha alta complexidade conforme aumentan o seu tamaño, como se comentaba anteriormente, e polo tanto, podería ser interesante abordalos desde a computación cuántica:

- **O problema do viaxeiro** [32] (TSP, polas súas siglas en inglés Traveling Salesman Problem): é un famoso problema de optimización combinatoria que formula a seguinte cuestión: Dado un conxunto de cidades e distancias entre cada par de cidades, cal sería o percorrido máis curto que un viaxeiro (coma un vendedor) debe facer para visitar cada cidade exactamente unha vez e despois volver ó punto de partida?

O obxectivo do TSP é atopar o camiño de menor lonxitude que visite todas as cidades sen repetir ningunha, regresando ó punto de partida. Considérase que o viaxeiro ten que percorrer todos os lugares unha soa vez e non pode volver a unha cidade anteriormente visitada.

Como é NP-Completo, non se coñece un algoritmo eficiente para resolvelo en tempo polinómico para todos os casos. A medida que a cantidade de cidades aumenta, a cantidade de posibles percorridos medra de maneira exponencial, o que fai que atopar a solución óptima sexa computacionalmente moi custoso.

O TSP ten aplicacións prácticas en diversos campos, como loxística, planificación de rutas, fabricación, deseño de circuítos electrónicos e moitas outras áreas onde é crucial atopar a ruta máis curta para visitar un conxunto de localizacións de maneira eficiente.

- **O problema da mochila** [33] (tamén coñecido como Knapsack Problem): é outro problema clásico de optimización combinatoria. Formúlase da seguinte forma:

Dado un conxunto de obxectos cada un cun peso e un valor asociado e unha mochila cunha capacidade máxima, como se poden seleccionar os obxectos para que o valor total sexa máximo e o peso total non supere a capacidade da mochila?

O problema da mochila é un problema de optimización combinatoria que tamén pertence á clase de problemas NP-Completo. A complexidade radica en que, de igual forma que o problema do viaxeiro, a cantidade de combinacións posibles de obxectos que se poden seleccionar para pór na mochila aumenta de maneira exponencial co tamaño do conxunto de obxectos, o que fai que atopar a solución óptima para grandes conxuntos sexa moi complicado.

O problema da mochila ten aplicacións prácticas en diversas áreas, como loxística, xestión de recursos e planificación financeira entre outros, onde se busca optimizar o valor dos obxectos que se poden levar nunha mochila ou cunha capacidade limitada.

- **O problema do coloreado** [34] (tamén coñecido como Graph Coloring Problem): é outro problema fundamental na teoría de grafos e a optimización combinatoria. Exponse do seguinte xeito:

Dado un grafo non dirixido  $G$ , é posible asignar unha cor a cada vértice do grafo de forma que non teña dous vértices adxacentes coa mesma cor?

Noutras palabras, o obxectivo do problema é atopar unha asignación de cores ós vértices do grafo de maneira que dous vértices conectados por unha aresta non compartan a mesma cor. A cantidade mínima de cores necesarias para realizar esta asignación coñécese como o número cromático do grafo.

Este problema tamén é NP-Completo e a súa dificultade radica na gran cantidade de posibles combinacións de cores e a necesidade de evitar que vértices contiguos teñan a mesma cor.

O problema do coloreado de grafos ten aplicacións en diversos campos, como a asignación de horarios, o deseño de mapas e circuítos, a planificación de redes de telecomunicacións e a resolución de problemas de planificación de tarefas onde é necesario evitar conflitos entre elementos conectados.

Como se pode supor a partir da recompilación de casos de uso máis adiante, resolver estes problemas implica unha mellora drástica en moitos procesos produtivos da industria. Segundo algúns artigos [35] [36], estímase que unha ganancia de produtividade do 2 ó 5 por cento, no contexto dunha industria que gasta \$500 mil millóns por ano en custos de fabricación, crearía un valor de \$10 mil millóns a \$25 mil millóns por ano.

## Panorama nacional

En España, existe unha rede de supercomputación de 14 nodos situados en diferentes centros de investigación e universidades [37], estes nodos son coñecidos como ordenadores HPC (*High Performance Computing*) e permiten procesar grandes cantidades de información.

O crecente interese e o apoio do goberno e as institucións académicas no desenvolvemento e implantación da computación cuántica nalgúns destes 14 nodos están axudando a impulsar esta tecnoloxía. Leváronse a cabo iniciativas e programas de investigación para impulsar a computación cuántica no país, como, por exemplo, a creación do proxecto *Quantum Spain*, que axudará á adquisición e implementación de tecnoloxía cuántica en territorio nacional.

Algúns dos 14 nodos distribuídos en toda a península e Canarias contan xa actualmente cun ordenador cuántico físico, ó HPC MareNostrum5, situado no nodo de Barcelona, ten un computador cuántico chamado "EuroQCS-España" de 5 cúbits [38] [39]. Este será o primeiro dunha serie que finalizará o 2025 cun de 30 cúbits. Ademais, actualmente o CESGA conta cun ordenador cuántico de 34 *cúbits* chamado Qmio grazas á súa colaboración con Fujitsu [40] [41] [42].

Tamén hai prevista unha posta en marcha dun ordenador cuántico nas instalacións de Ikerbasque, en San Sebastián, para finais de 2024. Este sistema chámase IBM Quantum System One, contará con 127 cúbits e estará xestionado por IBM [43].

Ademais, algúns nodos da RES (Red Española de Supercomputación) dispoñen de simuladores cuánticos [44], ou van dispor deles nun período relativamente curto de tempo [45], así como de xeradores cuánticos de números aleatorios [46], que se usan para incrementar a seguridade de determinados servizos.

A través destes emuladores, os investigadores poden desenvolver algoritmos cuánticos, así como estudar o comportamento de sistemas cuánticos sen necesidade de contar cun hardware cuántico real.

A comunidade científica está esforzándose en explorar os beneficios dos algoritmos cuantoinspirados e en descubrir novas técnicas de particionado de algoritmos cuánticos.

Os algoritmos cuantoinspirados son algoritmos deseñados ou influenciados polos principios da computación cuántica, aínda que se executan en computadoras clásicas.

As técnicas de particionado de algoritmos consisten en dividir un algoritmo cuántico en etapas ou módulos máis pequenos. Isto permite que a taxa de erro nos dispositivos NISQ diminúa, xa que hai máis erro conforme o tamaño do algoritmo aumenta. Ademais, permite simular grandes algoritmos nunha computadora cuántica aínda cando se dispón de pouca memoria cuántica [47].



## 3. Estado da arte

### Clases de problemas

A capacidade das computadoras cuánticas para manipular e procesar información utilizando principios cuánticos, como a superposición e o entrelazamento, abre novas portas en termos de rendemento e eficiencia en comparación coas computadoras clásicas en determinados tipos de tarefas, conseguindo realizar cálculos que doutra forma serían demasiado complexos para a tecnoloxía actual.

Existen varios dominios de problemas onde esta nova forma de procesamento de datos pode ofrecer vantaxes significativas, especialmente na industria automotriz [35]. En particular, e segundo o estudado, destacan catro conxuntos de problemas nos que unha computadora cuántica pode marcar unha gran diferenza nesta industria: optimización combinatoria, simulación cuántica, *machine learning* (en galego aprendizaxe automática) e criptografía [48].

Unha pequena mellora en cada unha destas áreas significa moito en termos de eficiencia de produción e unha inmensa cantidade de empresas veríanse enormemente beneficiadas utilizando a computación cuántica ou cuantoinspirada para resolver problemas enfocados nelas, que neste momento non poden ser resoltos co paradigma actual da computación clásica.

Nesta sección analizaranse os casos de uso relevantes para estes problemas e en especial os de maior importancia para a industria do automóbil. Con todo, a computación cuántica é un novo campo de investigación e non hai moitas empresas que apliquen a computación cuántica na fabricación industrial, en canto á industria automotriz, só algunhas empresas importantes como Volkswagen ou BMW decidiron comezar a indagar seriamente nesta tecnoloxía, identificando casos de uso reais e incluso levando a cabo probas prácticas con compañías como D-Wave Systems. Non obstante, pese a que aínda non se estudaran moitas aplicacións, existen algúns estudos e artigos científicos que indican que a computación cuántica pode ter un impacto moi importante en varias industrias, incluída a automotriz [36][49].

Na próxima parte explicaranse brevemente as vantaxes que ofrece a computación cuántica en cada un dos catro dominios de problemas citados e, ademais, definiranse os casos de uso atopados nesta investigación que teñen relación con eles, xunto coas compañías que os estudaron.

Considérase tamén obxecto deste estudo indicar cales son os algoritmos que poderían ser útiles nos dominios de problemas citados e, en cada clase de problema, polo tanto, engadíronse os algoritmos que parecen ser máis adecuados para eles, no caso de que se especificara algún nas referencias nas que se basea a investigación.

A continuación analizarase a situación actual da computación cuántica na industria utilizando a información obtida.

## Optimización combinatoria

Na súa maior parte son problemas de tipo NP-Completo, poden abarcar desde a planificación de rutas e horarios ata o deseño de estruturas e a optimización de procesos industriais. Como a aplicación deste tipo de problemas é tan ampla, verase que representan a maior parte dos casos de uso recompilados.

A computación cuántica é unha poderosa ferramenta neste campo, ofrecendo a capacidade de resolver problemas de optimización combinatoria de forma máis eficiente que a clásica. Isto débese a que as computadoras cuánticas poden aproveitar os principios da mecánica cuántica, como a superposición e o entrelazamento, para explorar múltiples solucións en paralelo.

Existen varias técnicas de computación para resolver este tipo de problemas, unhas baséanse en solucións cuantoinspiradas, tendo solucións específicas para este tipo de problemas, e outras baséanse nunha técnica denominada *quantum annealing* [50], unha técnica moi eficiente da que xa se falara en seccións anteriores e que é parecida á súa contraparte clásica, o *simulated annealing*.

Ademais do *quantum annealing* hai outros algoritmos de interese para a computación cuántica universal que axudan a resolver problemas deste tipo, os que se encontraron relevantes no estudo son: *Quantum Adiabatic Algorithm* [51], *Grover Adaptive Search* [52], MOQEA (*Multiobjective Quantum Evolutionary Algorithm*) [53], *Duerr-Høyer*, VQE (*Variational Quantum Eigensolver*) [54] e QAOA (*Quantum Approximate Optimization Algorithm*) [55]. A continuación, antes de continuar co resto de clases de problemas, explicaránse brevemente estes algoritmos.

- **O algoritmo QAOA** combina técnicas de optimización clásicas con portas cuánticas para buscar o conxunto de parámetros óptimos que maximizan ou minimizan unha función obxectivo asociada co problema de optimización [55].

É un algoritmo de baixa profundidade, o que significa que non necesita moita coherencia para ser executado e algúns resultados indican que é o suficientemente robusto a erros.

Está deseñado para resolver problemas de tipo NP-Completo como o problema MaxCut. Este pertence á lista de Karp da que xa se falou con anterioridade neste documento e céntrase en buscar unha partición de vértices nun grafo que maximice a área dos dous conxuntos a separar [56].

En esencia, o algoritmo utiliza unha secuencia alternada de operadores unitarios cuánticos e unha función de probabilidade clásica para buscar o valor óptimo dos parámetros. O primeiro operador unitario separa os *cúbits* en fase, o segundo en amplitude. Os parámetros que buscan a función de probabilidade clásica determinan canto se separan en fase os *cúbits* ó utilizar o primeiro operador e canto van aumentar a amplitude do segundo. Desta maneira, ó finalizar o algoritmo, o *cúbit* que teña maior amplitude será o que máis probabilidades teña de ser observado.

- **O Quantum Adiabatic Algorithm**, de igual forma que o *quantum annealing*, baséase na teoría cuántica adiabática. En termos xerais, o algoritmo utiliza unha transformación adiabática gradual dun hamiltoniano inicialmente sinxelo a un hamiltoniano final que codifica o problema de optimización [51]. O obxectivo é atopar o estado fundamental do hamiltoniano final, que corresponderá á solución aproximada do problema de optimización.

A idea central detrás do algoritmo adiabático é que, se o cambio de hamiltoniano entre os dous extremos é o suficientemente lento, o sistema permanecerá no estado fundamental ó longo de todo o proceso de evolución. Con todo, para que o algoritmo sexa efectivo, é importante que o tempo requirido para a transformación adiabática sexa polinomial no tamaño do problema de optimización, do contrario, perdería a súa vantaxe sobre algoritmos clásicos.

- Os algoritmos **Grover Adaptive Search** e **Duerr-Høyer** están deseñados para buscar unha entrada desexada nunha base de datos non estruturada de maneira máis eficiente que os algoritmos clásicos equivalentes [57]. Se ben son algoritmos relacionados coa busca, non son propiamente un algoritmo de optimización como o *Quantum Approximate Optimization Algorithm* (QAOA) ou o *Quantum Adiabatic Algorithm*, que buscan solucións óptimas para problemas de optimización combinatoria.

- **MOQEA** utiliza a combinación de algoritmos evolutivos cuánticos (QEA) e a optimización multiobxectivo para obter un conxunto de solucións óptimas. Neste enfoque, búscase encontrar un conxunto de solucións non dominadas no espazo de procura que satisfagan diferentes criterios e obxectivos. Pódese usar, por exemplo, para rutas de vehículos [53].

Os QEAs aplican operadores cuánticos a un conxunto de solucións representadas como *cúbits*. Cada solución neste conxunto representa unha solución óptima ou aproximadamente óptima para o problema en cuestión.

O proceso de procura nun algoritmo evolutivo cuántico multiobxectivo implica a evolución iterativa da poboación de solucións mediante a aplicación de operadores cuánticos, a avaliación da calidade das solucións en función dos diferentes obxectivos e a selección de solucións para formar á próxima xeración.

- **OVQE** é un algoritmo cuántico utilizado para atopar aproximacións ós estados de enerxía máis baixos. Combina a computación cuántica coa optimización clásica.

Este algoritmo propúxose como unha alternativa ós algoritmos totalmente cuánticos como QPE, que necesitan un hardware cuántico o suficientemente grande para resolver problemas de interese ó que non se vai ter acceso nun futuro próximo.

É especialmente útil en problemas onde o tamaño do sistema fai que a solución directa sexa inviable nunha computadora cuántica de tamaño limitado. Aínda que a aproximación obtida non é exacta, o VQE é unha ferramenta prometedora xa que pode brindar resultados valiosos con recursos computacionais manexables [54].

## Simulación cuántica

A computación cuántica é especialmente adecuada para realizar simulacións cuánticas debido á súa capacidade para modelar e simular sistemas complexos cunha precisión e eficiencia significativamente superiores ás das computadoras clásicas.

En computadoras clásicas as simulacións son complexas debido á gran cantidade de cálculos que se deben facer para simular un sistema que ten en conta unha gran cantidade de partículas e variables.

En 1996, o científico Seth Lloyd, demostrou que a computación cuántica pode ser máis eficiente que a computación clásica á hora de simular sistemas cuánticos locais [58]. Actualmente, a simulación cuántica pódese utilizar para estudar a dinámica dunha gran amplitude de sistemas cuánticos, como poden ser sistemas de moléculas, analizar a composición de materiais, estudar reaccións químicas, etc.

Compañías como Toyota, Mercedes, Volkswagen ou BMW xa comezaron a facer simulacións cuánticas para estudar a eficiencia de materiais como o carbono ou o hidróxeno, ademais de simular baterías eléctricas fabricadas con outros materiais [59][60].

Segundo o investigado, para realizar simulacións os algoritmos máis relevantes encontrados no estudo son: o *Variational Quantum Eigensolver* (VQE), o *Quantum Phase Estimation* (QPE) e o *Quantum algorithm for linear systems of equations* (HHL) [61]. A continuación, antes de profundar nos diferentes casos de uso, explicaranse brevemente.

- **O VQE**, explicado anteriormente.
- **O QPE**, a diferenza do algoritmo VQE, é un algoritmo totalmente cuántico e baséase na transformada cuántica de Fourier (QFT) aplicada ós estados do sistema.

O QPE é fundamental como subrutina en moitos algoritmos cuánticos, como o HHL, o algoritmo de Grover ou o de Shor. Esta subrutina, coma o seu nome indica, úsase para atopar o autovalor asociado a un autovector de  $A$ . De maneira máis exemplificada: sendo  $A$  unha matriz unitaria e seu autovector  $B$ , atopar a fase do autovalor  $C$  que cumpra:

$$A \times B = C \times B$$

Cantos menos erros se quere que dea este método, máis se ten que aumentar o número de *cúbits* do circuíto que se utilizará para facer os cálculos de estimación. O problema é que se producen circuítos demasiado grandes e por causa do "ruído" da tecnoloxía actual, canto máis grandes sexan os circuítos, máis erros acumulados van ter os resultados, porque as portas lóxicas cuánticas non son totalmente precisas [62].

- **O algoritmo *Quantum algorithm for linear systems of equations* (HHL)** está deseñado para resolver sistemas de ecuacións lineais exponencialmente máis rápido que os algoritmos clásicos equivalentes. Foi proposto por Aram Harrow, Avinatan Hassidim e Seth Lloyd en 2009, de aí o seu nome.

O problema de resolver sistemas de ecuacións lineais é un desafío común en moitas aplicacións científicas e de enxeñería. A medida que o tamaño dos sistemas medra, os algoritmos clásicos tradicionais poden rematar sendo extremadamente ineficientes.

A formulación básica do problema que o algoritmo HHL resolve é o seguinte: dada unha matriz hermitiana  $A$  de tamaño  $N \times N$  (unha matriz cadrada cuxa matriz adxunta é igual á súa trasposta conxugada) e un vector de entrada  $b$  de igual lonxitude  $N$ , o obxectivo é atopar un vector  $x$  tal que  $Ax = b$  [63]. En termos clásicos isto implicaría resolver  $N$  ecuacións lineais con  $N$  incógnitas, o que pode ser computacionalmente custoso para sistemas grandes.

O algoritmo HHL aproveita a transformada cuántica de Fourier (QFT) e o proceso de inversión cuántica para lograr un rendemento máis eficiente na resolución do sistema de ecuacións. A principal vantaxe de HHL radica en que o seu tempo de execución é polinomial en  $\log(N)$  e non en  $N$ , como sería o caso dos algoritmos clásicos.

## Aprendizaxe automática

O obxectivo principal da aprendizaxe automática cuántica é utilizar a vantaxe cuántica proporcionada polos algoritmos e recursos cuánticos para mellorar a eficiencia e precisión dos modelos de aprendizaxe automática en comparación cos métodos clásicos. Algunhas das aplicacións potenciais na industria da aprendizaxe automática cuántica inclúen o recoñecemento de patróns, a clasificación dos datos, a optimización, a resolución de problemas de procura e a simulación.

Neste ámbito e para os casos de uso atopados na investigación, os algoritmos máis relevantes son: VQC (*Variational Quantum Classifier*) e QNN (*Quantum Neural Network*). A continuación, explicaranse brevemente, antes de profundar nos casos de uso atopados para esta clase de problemas.

- En canto ós **VQC**, o concepto principal é utilizar un circuíto cuántico con parámetros variables (tamén coñecido como circuíto *ansatz*) para representar unha función cuántica. Despois, axústanse estes parámetros para optimizar unha certa función de custo que representa o problema cuántico que se desexa resolver.

Noutras palabras, un VQC é un algoritmo cuántico-clásico no que se adestra un circuíto cuántico axustando os seus parámetros para que o resultado de cálculo se acerque o máis posible á solución desexada.

O algoritmo consta de dúas partes principais: unha etapa de adestramento e unha etapa de clasificación. Proporciónase un conxunto de puntos de datos etiquetados, sobre os que se realiza o algoritmo. Para a etapa de clasificación, tómase un conxunto diferente de puntos de datos e execútase o circuíto de clasificación optimizado neles.

O obxecto será clasificado nun conxunto ou noutro dependendo do resultado da función [64].

- **O QNN** é un tipo de arquitectura de redes neuronais que utiliza recursos e operacións cuánticas para realizar tarefas de aprendizaxe automática. A diferenza das redes neuronais clásicas, as QNN utilizan *cúbits* e portas cuánticas en lugar de neuronas e portas clásicas [65].

O QNN consta de capas cuánticas que realizan operacións cuánticas, como portas dun só *cúbit* e portas controladas, seguidas de operacións de medición para obter resultados clásicos. O proceso de adestramento dun QNN implica axustar os parámetros cuánticos para minimizar unha función de custo que mide o error entre as predicións do modelo e as etiquetas reais.

Aínda que estes dous algoritmos poidan ser similares, existen diferenzas nas súas aplicacións xa que as VQC utilízanse principalmente para tarefas de clasificación como clasificar datos en diferentes categorías, mentres que as QNN poden aplicarse tanto a clasificación como a outra ampla gama de problemas de aprendizaxe automática e análise de datos que non se limitan unicamente a ese tipo de problemas.

Encontráronse estudos nos que se di que a aprendizaxe automática cuántica pode ser de utilidade no ámbito da seguridade dentro do campo da automoción, en concreto para evitar ataques a vehículos autónomos [66]. Ademais, cabe destacar que os algoritmos de aprendizaxe automática poden utilizarse dentro doutros campos e por tanto a aprendizaxe automática cuántica á súa vez tamén pode afectar a outras problemáticas e casos de uso, sendo unha ferramenta bastante transversal que pode combinarse con outras solucións.

## Criptografía

A criptografía cuántica é un campo da criptografía que utiliza principios e propiedades da mecánica cuántica para garantir a seguridade das comunicacións e protexer a información contra ataques cibernéticos, ademais, é segura incluso contra os futuros ataques de algoritmos de cómputo cuántico.

Ademais, a criptografía clásica baséase en problemas computacionais difíciles de resolver para protexer os datos. Un dos algoritmos clásicos máis coñecidos en ciberseguridade é o algoritmo RSA [67]. Este algoritmo baséase na dificultade matemática de factorizar números moi grandes en números primos.

Así e todo, mediante a computación cuántica, estes procesos pódense acelerar con algoritmos como o de Shor [68]. O que fai este algoritmo é factorizar números moi extensos, o que pon en perigo a confidencialidade de todos os datos cifrados con RSA. É por esta razón que a computación cuántica pode ser unha ameaza para a encriptación clásica.

Así mesmo, a encriptación cuántica baséase nas leis fundamentais da mecánica cuántica, que aseguran a total confidencialidade dos datos, baseándose nunha serie de principios clave:

- Incerteza cuántica: a observación dunha partícula cuántica perturba o seu estado de superposición orixinal, o que fai que calquera intento de escoitar ou medir a información transmitida resulte nunha alteración detectable, o que permite detectar ós intrusos e protexer a integridade dos datos.
- Non clonación cuántica: é imposible crear copias idénticas dunha partícula cuántica descoñecida. Isto evita que un atacante obteña unha copia da clave cuántica sen que o receptor o detecte.
- Entrelazamento cuántico: é unha propiedade fundamental das partículas cuánticas que están conectadas de maneira que o estado dunha partícula está relacionado co doutra. Independentemente da distancia entre elas, isto utilízase en protocolos de criptografía cuántica para establecer claves secretas de forma segura. Se se mide unha partícula que está entrelazada cunha segunda partícula, entón a segunda colapsará e se coñecerá que a primeira foi medida.

Non se atoparon moitas aplicacións de criptografía cuántica que se poidan aplicar especificamente á industria automobilística, con todo, espérase que nun futuro onde a conducción autónoma dos vehículos estea cada vez máis cerca, esta poda verse afectada por cibercriminais que intenten interferir cos sistemas de control dos



vehículos. Neste escenario, tanto a seguridade como a privacidade dos datos transmitidos tornan críticos. É aquí onde a criptografía cuántica podería desempeñar un papel importante, detectando os ataques dos ciberdelincuentes e intentando reprimilos. Hai algúns estudos [69] que indican que nun futuro será importante que os automóviles contén con maiores requirimentos de seguridade nos módulos integrados neles (HSM, *Hardware Secure Module*) nas súas unidades centrais de electrónica (ECU, *Electronic Central Unit*). Ademais, aínda que na actualidade non existan computadoras o suficientemente potentes como para descriptar RSA existen ataques cibernéticos como a técnica *Store Now Decrypt Later* [70] que consiste en recoller toda a información posible e agardar o tempo suficiente como para que unha computadora cuántica universal poida utilizar o algoritmo de Shor para descriptar a información, estas técnicas veríanse mitigadas con protocolos seguros de criptografía poscuántica, isto axudaría as empresas a gardar a información con total seguridade, incluso sabendo que no futuro haberá computadoras cuánticas capaces de executar o algoritmo de Shor.

## Casos de uso

Neste apartado preséntanse unha serie de exemplos de formulación de problemas, algúns deles estudáronse, experimentáronse ou probáronse por empresas mentres que outros son aplicacións con vistas ó futuro.

### *Experimentos ou probas de casos de uso*

Nesta sección preséntanse casos de experimentos ou probas realizados por universidades, grupos de investigación ou empresas. Ademais, estes están clasificados segundo o tipo de problema que resollen (optimización, simulación, aprendizaxe automática e criptografía). Para facilitar a lectura do documento, as táboas asociadas a estes exemplos encóntranse no Anexo A. Posteriormente na Sección 3.2, "Exemplos de casos de uso postos na práctica", desenvolveranse algúns dos exemplos do Anexo A de varias grandes compañías.

## *Casos de uso con perspectiva de futuro*

Ademais das aplicacións descritas nos estudos anteriormente especificados, existen artigos en revistas, entrevistas e diferentes estudos que falan sobre futuras aplicacións potenciais da computación cuántica que tratan un amplo abanico de problemáticas. A continuación, entrarase máis en profundidade.

**O QUTAC**, en galego Consorcio de aplicacións e tecnoloxía cuántica, está a levar a computación cuántica ó nivel de aplicación industrial a gran escala e preparando ás empresas para un futuro dixital. Ten coma membros a 13 das principais corporacións alemás e realizaron un estudo con entrevistas ós diferentes membros do consorcio que indica que haberá aplicacións para as que a computación cuántica poida ser de utilidade tanto a curto coma a longo prazo. As conclusións destas entrevistas e as aplicacións ás que chegou o QUTAC encóntranse recollidas no Anexo B.

Por outro lado, **BMW** recolleu varios casos de uso para os que a computación cuántica pode ser de utilidade, están divididos en tres áreas: optimización, simulación e aprendizaxe automática. Estes casos de uso están recollidos no Anexo C.

**A revista McKinsey** presenta tamén varios artigos onde numera diversos casos de uso para a computación cuántica. Na referencia [36] enuméranse distintos casos de uso clasificados por tipos de problemas e tamén por eras tecnolóxicas. Ademais, en [35] entrevistaron a 47 profesionais sobre hardware, software e aplicacións da computación cuántica e atoparon posibles casos de uso clasificándoos en distintas eras e etapas da computación cuántica segundo o avance do desenvolvemento do hardware. Estes casos poden consultarse no Anexo D.

A firma de consultaría **Boston Consulting Group (BCG)** realizou varios estudos sobre a computación cuántica na que se teñen en conta diversos aspectos deste campo [71][72][73][74]. Nestes estudos preséntanse unha gran cantidade de información analizando o sector, desde cales compañías internacionais atópanse en proceso de experimentación ata diferentes *startups* que se centran nesta área. Entre outros datos tamén se atopan a capacidade económica destas empresas e a cantidade de diñeiro que tratan de investir no sector da cuántica podendo ver que empresas teñen unha maior interese neste campo. Entre outros datos que poden ser de interese tamén se atopa unha valoración do número de publicacións de diferentes países e a colaboración entre eles, podendo ver que países están poñendo un maior empeño neste tipo de investigación. Finalmente, entre varios datos que ofrecen estes artigos

atópanse unha serie de problemáticas que poden ser interesantes para abordar desde o punto de vista cuántico. Estes campos de investigación esquematizáronse no Anexo E para facilitar a súa lectura.

Hai tamén outros estudos onde se proporcionan casos de uso futuros tanto para a industria automotriz como para outro tipos de industrias:

Na referencia [75] atópase un artigo onde varios científicos de Volkswagen responden unha serie de cuestións e, á súa vez, nomean varias aplicacións realizadas na compañía por computadoras cuánticas. Algunhas das aplicacións realizadas foron: a simulación da optimización do tráfico para reducir a conxestión do mesmo en Pekín e a asignación de taxis en tempo real en Lisboa. Tamén comenta que optimizaron a forma dun espello dun automóbil para reducir o ruído acústico ademais de realizar simulacións cuánticas de moléculas, que lles permitirán investigar novos materiais e ter en conta as súas propiedades.

Ademais, argumentan que as aplicacións promesa da computación cuántica están dentro da área de aprendizaxe automática, porque polas súas características pode ser máis robusta fronte ó ruído, facéndoo unha ferramenta potente en computadoras cuánticas. Non obstante, non están o suficientemente avanzadas para traballar en condicións ideais porque presentan dificultades para ler datos de entrada. Isto fai que problemas como o mantemento predictivo de máquinas, cambios de prezos no mercado da industria automotriz ou a predición da conxestión do tráfico sexan bos candidatos para os algoritmos de aprendizaxe automática cuántica. Para finalizar, comentan que os algoritmos de aprendizaxe automática cuántica poden revolucionar a investigación en automóviles autónomos.

Por outro lado, na referencia [76] atópase que a computación cuántica pódese usar para un gran abanico de problemas de optimización. Estes problemas pódense atopar en áreas tan diversas como son a ciberseguridade, a enxeñería química, as finanzas e a fabricación avanzada de produtos.

Á súa vez, dentro destas, pódense atopar casos de uso para subáreas como: a criptografía poscuántica, o descubrimento de materiais, o desenvolvemento de novos medicamentos, entender a estrutura das moléculas e as súas propiedades, a creación de novos materiais, acelerar as simulacións de Monte Carlo e mellorar a toma de decisións no ámbito das finanzas ó identificar fallos nos procesos de fabricación.

É interesante analizar estas posibles aplicacións futuras para observar que dirección vai tomar este campo e adoptar as medidas necesarias para aproveitar este novo

paradigma. Ademais, ó atoparse nunha etapa temperá e de investigación, este tipo de estudos toman máis importancia, e marcan o rumbo a seguir.

## Exemplos de casos de uso postos en práctica

De todos os casos de uso estudados, só algúns se puxeron na práctica ou foron simulados. Ademais, aínda que hai varios dominios de problemas, a maioría dos retos solucionados pertencen a problemas de optimización e para resolvelos, a miúdo utilízanse procesos adiabáticos como o *quantum annealing* de D-Wave Systems, ou solucións cuantoinspiradas como o DA de Fujitsu, isto débese a que as computadoras cuánticas universais aínda teñen poucos *cúbits* para solucionar problemas de escala industrial.

Este apartado busca explicar con máis detalle aqueles casos de uso especificados nos anexos que se consideran máis relevantes para a industria, os cales se levaron a cabo por diferentes compañías que teñen que ver coa automoción. Ademais das aplicacións que se realizaron, tamén se recollen algunhas que se van explicar con máis detemento.

Segundo o noso estudo, algúns dos casos máis relevantes atopados foron:

CASOS DE USO REALIZADOS	
<b>VOLKSWAGEN</b>	<p>Optimización da produción en plantas de fabricación.</p> <p>Optimización do tráfico para reducir o tempo da viaxe de buses e taxis.</p> <p>Simulación de compoñentes para baterías.</p>
<b>BMW</b>	<p>Optimización das posicións de sensores para funcións de conducción automatizada.</p>

	<p>Simulación da deformación de materiais no proceso de produción.</p> <p>Optimización da configuración de vehículos de preproducción.</p> <p>Aprendizaxe automática para a avaliación automatizada da calidade.</p> <p>Optimización de rutas de selado.</p>
<b>MERCEDES-BENZ</b>	Simulación de moléculas de electrólito en baterías de ións de litio.
<b>TOYOTA</b>	<p>Simulación cuántica para a optimización de moléculas.</p> <p>Optimización de sinais de tráfico.</p>
<b>FORD</b>	Optimización de rutas para reducir o consumo de combustible.
<b>DENSO</b>	Control óptimo de vehículos guiados.
<b>MITSUBISHI SHIMIZU</b>	Optimización do fluxo de tráfico das rutas de transporte de residuos.
<b>HYUNDAI</b>	Recoñecemento de imaxe en automóviles.
<b>FUJITSU</b>	<p>Optimización de rutas no porto de Hamburgo.</p> <p>Optimización da disposición dos estantes de pezas nun almacén.</p> <p>Asignación de traballadores.</p>

Táboa 1.

A continuación, explicaranse con máis detalle estes exemplos de casos de uso reais onde empresas relacionadas co sector da automoción experimentaron coa computación cuántica para resolver distintos problemas de interese para a industria.

## Volkswagen

A compañía Volkswagen estudou de forma práctica a utilización da computación cuántica en, polo menos, catro situacións. Nestas catro investigacións contaron coa axuda de D-Wave Systems.

### *Optimización dun taller de pintura*

O problema do posto de pintura refírese a un conxunto de problemas de optimización combinatoria na industria automotriz. Este tipo de problemas son extremadamente difíciles de resolver cun computador clásico, polo que decidiron buscar unha solución inspirada en computación cuántica.

No caso de Volkswagen, dábanlle cor a pezas de branco e negro e despois desa cor inicial dábanlle outra capa de cor por enriba. O custo deste proceso está en que cada vez que cambian a cor, as máquinas teñen que baleirarse e lavarse, polo que tiñan que optimizar o proceso para pintar da mesma cor as máximas pezas seguidas posibles.

As probas realizáronse nun taller de pintura en Wolfsburg, Alemaña, e se utilizaron un total de 104334 automóviles.

Usáronse algoritmos de solucións de optimización clásicas, cuánticas e híbridas, e interpretaron os resultados en relación a dous réximes diferentes: pequena escala (10 a 100 automóviles) e industrial (de 300 a 3000 automóviles).

Comparáronse os resultados cos que se daría unha solución aleatoria de cor, e o algoritmo que mellores resultados deu para todos os tamaños de mostras de automóviles foi o HSS (Hybrid Solver Service). Este é un algoritmo híbrido cuántico-clásico de D-Wave que aproveita o acceso a unha QPU dentro do seu ciclo interno de optimización [77].

### *Simulación de optimización do tráfico de taxis en Pekín*

Neste estudo quería optimizar o tempo que tarda un conxunto de automóviles en viaxar entre a súa orixe e os seus destinos finais dunha forma individual. Para isto, utilizouse un conxunto de datos de traxectoria de T-Drive que contén traxectorias de 10357 taxis rexistrados durante unha semana. Deses 10357 taxis utilizouse un subconxunto de 418 que ían desde o centro da cidade ó aeroporto de Pekín e viceversa. Os pasos que seguiron para levar a cabo as probas foron os seguintes:

1. Clásico: mapa de preprocesamento de datos de GPS.
2. Clásico: identificar as áreas onde se produce a conxestión do tráfico.
3. Clásico: determinar rutas alternativas espacial e temporalmente válidas para cada automóbil no conxunto de datos, se é posible.

4. Clásico: formular o problema de minimización como un QUBO (para minimizar a congestión nos tramos de carretera en rutas superpostas).
5. Híbrido cuántico/clásico: atopa unha solución que reduza a congestión entre as asignacións de ruta do tráfico.
6. Clásico: redistribúe os coches en función dos resultados.

Co termo clásico refírese ós cálculos en máquinas clásicas e o termo cuántico refírese a cálculos no sistema D-Wave.

Posteriormente repítense os pasos 2 e 6 ata que non se identifique a congestión de tráfico.

A cada automóbil asignáronselles 3 rutas polas que poderían chegar ó seu destino. Ademais, a solución final expón un escenario no que a congestión é mínima. Para os resultados, asumiron que unha vía congestionábase se un segmento aparece en máis de N rutas de automóviles, neste caso escolleron  $N=10$ .

As QPU de D-Wave non poden resolver problemas QUBO grandes, por iso utilizouse o algoritmo *qbsolv* de D-Wave. Este algoritmo divide o problema QUBO en problemas máis pequenos que son procesados polas QPU. Este proceso itera ata que non atopa ningunha mellora na solución.

Resolveron o problema 50 veces usando *qbsolv*. Tamén xeraron 50 asignacións aleatorias de vehículos a rutas como referencia, isto lles serviu para comparar os resultados obtidos con *qbsolv* cos resultados das rutas aleatorias.

Despois de executar os experimentos, o algoritmo *qbsolv* tivo mellores resultados tanto comparándoo coa asignación aleatoria, como comparándoo coa asignación orixinal das rutas [75][78].

## *Optimización do tráfico de autobuses e taxis en Lisboa*

Este estudo foi dividido en dúas fases.

O obxectivo da primeira fase foi obter matrices orixe/destino que detallaran o volume de fluxos de movemento desde o lugar da conferencia Web Summit (Altice Arena) cara diferentes zonas da cidade de Lisboa, en intervalos dunha hora. Os resultados da análise de PTV Group (unha empresa de consultaría de tráfico e loxística) mostraron un total de 225 matrices orixe/destino dunha área de estudo de 93 zonas en todo Lisboa.

A segunda fase da análise de movementos consistiu en obter as coordenadas exactas de novas paradas de autobús ou paradas existentes que se incluírían no novo servizo *Quantum Shuttle* e reforzar a rede de transporte público existente. Para isto, analizáronse as localizacións das maiores conxestións causadas polo tráfico da conferencia.

Como resultado, identificáronse 12 zonas de alta demanda cara e desde a Web Summit. Extraéronse os viaxeiros por hora para cada unha, separados por modos de transporte público e transporte privado. Finalmente, seleccionaron catro zonas para cubrir a demanda matutina e vespertina.

Para determinar os horarios da frota, identificaron que a demanda máxima de tráfico nas horas seleccionadas era de 09:00 a 10:00 e de 10:00 a 11:00, con 6314 viaxes cara Web Summit. Para a demanda da tarde (as viaxes de volta ó centro da cidade) as horas pico foron de 16:00 a 17:00 e de 17:00 a 18:00, con 7600 viaxes saíndo da Web Summit. Dada a análise realizada para cada unha das catro zonas seleccionadas e considerando a demanda estimada tanto na mañá como na tarde, propuxéronse un total de 9 autobuses da empresa de transporte Carris como recomendación para o volume da frota de *Quantum Shuttle*.

Para que o experimento funcionara adecuadamente requirían que se consolidase simultaneamente unha conexión en vivo entre tres servizos diferentes: a aplicación de navegación Android, os datos de tráfico e a optimización cuántica [79].

### *Simulación de baterías*

Volkswagen tamén está investigando tanto a simulación de compoñentes de baterías, como a simulación de baterías enteiras para a mellora da autonomía dos automóbiles e gañar a carreira do desenvolvemento de baterías de vehículos eléctricos [80].



## BMW

Para recoller novos socios afíns á computación cuántica, BMW lanzou en 2021 un concurso a nivel mundial de computación cuántica que consistía na resolución de catro problemas importantes para a produción de vehículos: preproducción da configuración dun vehículo, simulación da deformación dun material en produción, localización de sensores nun vehículo e o uso de aprendizaxe automática para asistencia da calidade de forma automática.

### *Preproducción da configuración dun vehículo: One QuBit eNTiTy*

Este primeiro problema consistía en maximizar o número de probas a realizar nun vehículo, minimizando os vehículos ós que lles fan probas, tendo en conta a forma e as restricións dos mesmos.

A solución gañadora aportada pola empresa One QuBit eNTiTy (formada polas empresas 1Qbit, NTT Research e NTT Data) consistía na combinación dunha aproximación híbrida e algoritmos de impacto a curto e longo prazo con hardware, tamén cuántico, tolerante a fallas. Sendo os algoritmos: *Duerr-Hoyer* e o *Quantum Amplitude Amplification*.

A maiores e de forma complementaria desenvolveron unha técnica de optimización nativa híbrida modular.

Ademais, a empresa engadiu *plugins* para dispositivos cuantoinspirados [81].

### *Simulación da deformación dun material en produción: Qu&Co*

Neste problema propúxose desenvolver un algoritmo que conseguise modelar e simular de forma numérica a deformación dun material dado. O interese nesta proposta baséase en coñecer as propiedades dun determinado material utilizado nos compoñentes en fase de preproducción dun vehículo.

O gañador que deu solución a este problema foi a compañía Qu&Co. Propuxo un algoritmo para NISQ baseado en circuitos cuánticos diferenciables, sendo o problema formulado xeneralizable para ecuacións parcialmente diferenciables non lineais.

Ademais da propia solución, incluíron comparacións para resultados exactos e baseados en redes neuronais clásicas [81].

### *Localización de sensores nun vehículo: Accenture*

A seguinte proposta céntrase en situar os sensores necesarios dun vehículo da mellor forma posible, ofrecendo o máximo de cobertura, mais mantendo o menor número de sensores debido ó alto custo que ten cada un deles. Desta forma, se conseguiría unha distribución óptima dos mesmos sen aumentar o prezo final.

A empresa que obtivo a solución foi Accenture, propoñendo un fluxo holístico para analizar diferentes partes do problema, definir a entrada de datos, pasando polos pasos de procesado, a optimización do problema de cobertura máxima subxacente e finalmente a visualización dos resultados nunha aplicación onde observar os sensores distribuídos.

Para o problema de optimización desenvolveuse un marco xeral no que se incluían catro clases de algoritmos e aínda que os mellores resultados neste caso obtivéronse mediante algoritmos clásicos personalizados, o marco de traballo proposto por Accenture daba *plugins* para desenvolver métodos cuánticos nun futuro [81].

### *Uso de aprendizaxe automática para asistencia de calidade: QC Ware*

Para o último problema proposto quería-se indagar en novas aproximacións de algoritmos cuánticos ou híbridos de aprendizaxe automática. Buscábase que estes algoritmos tivesen resultados que ofrezan unha exactitude maior para axudar no ensamblado automatizado de vehículos.

A proposta gañadora, dada polo equipo QC Ware constaba de tres algoritmos cuánticos baseados en álgebra lineal para realizar produtos convolucionais con máis rapidez que os algoritmos análogos clásicos para a clasificación automática de imaxe.

Os algoritmos cuánticos non lograron mellorar os resultados das simulacións numéricas realizadas de maneira clásica nos dous *datasets* de imaxes, con todo, o traballo de QC Ware permite coñecer onde usar algoritmos cuánticos para mellorar as técnicas de *deep learning* nun futuro [81].

## *Optimización de rutas de robots para aplicar selados de PVC*

Para protexer a parte inferior dun automóbil da corrosión, as unións de soldadura expostas sélanse aplicando unha capa de PVC. O robot necesita atravesar as unións de soldadura para aplicar este material.

O obxectivo é que o robot realice o seu traballo coa máxima calidade posible no menor tempo necesario.

O problema pertence ó dominio de problemas de optimización que se clasifica como NP-Completo. Unha formulación matemática típica do modelo é un grafo ponderado, que codifica a distancia entre todas as combinacións posibles de puntos de inicio e fin. O obxectivo é atopar unha combinación destes puntos conectados que representen o camiño máis curto que debe percorrerse, e por tanto o tempo máis curto necesario.

Para un computador cuántico, unha formulación matemática adecuada é a formulación QUBO, que se pode derivar do grafo do típico problema do viaxeiro.

Nesta formulación, asígnanse variables binarias á decisión de asignar un robot a unha unión de soldadura específica nun tempo normalizado, para todas as unións e todos os tempos.

O problema QUBO pode resolverse utilizando un método de *quantum annealing*. O mapeo máis directo require  $M$  *cúbits* para  $M$  variables binarias. Outro posible algoritmo para resolver este problema é unha computadora cuántica baseada en portas lóxicas como é o QAOA [82] [83].

## **Mercedes-Benz**

### *Simulación de moléculas de electrólito en baterías de ións de litio*

En Mercedes-Benz están a investigar un enfoque de computación cuántica baseado en fusión (*fusión-based quantum computing*) para simular moléculas de electrólito en baterías de ións de litio nun computador cuántico fotónico tolerante a fallas. O obxectivo é centrarse nas moléculas que poden proporcionar solucións prácticas a problemas relevantes na industria.

No contexto da computación cuántica tolerante a fallas, certas operacións requiren o uso de "estados máxicos" que funcionan coma un sistema de redundancia para evitar erros.

O texto propón un método para consumir múltiples estados máxicos simultaneamente, o que podería reducir significativamente o tempo de execución computacional sen gastos adicionais no tamaño do computador cuántico.

En resumo, o texto destaca como se estima o uso de recursos nunha computadora cuántica baseada en fusión para simular moléculas de electrólito en baterías de ións de litio. Enfócase en moléculas que teñen aplicacións prácticas en problemas industriais relevantes e propón o uso de múltiples “fábricas de estados máxicos” para producir estados cuánticos en paralelo e mellorar a eficiencia computacional [60].

## Toyota

### *Computación cuántica para a optimización de moléculas*

O custo computacional en moléculas medra exponencialmente co tamaño das mesmas, o que fai que este tipo de problemas computacionalmente imposibles de calcular para un ordenador convencional mentres que este custo pode reducirse a tempo polinomial en computadoras cuánticas.

Normalmente moitos algoritmos de computación cuántica como o QPE ou o VQE utilizan a aproximación de Born-Oppenheimer para acelerar o proceso, xa que lles permite tratar as funcións de onda dos núcleos atómicos e os electróns por separado, o que facilita o cálculo. Con todo, esta maneira de tratar as partículas atómicas ten as súas desvantaxes.

Requírese unha gran cantidade de execucións e observacións (medidas para *cúbits*) para obter os valores óptimos, mais, ó medir, destrúese gran cantidade de información. Ademais, é necesario repetir a operación en cada iteración do proceso de optimización e o sistema a miúdo reláxase ata o mínimo local máis próximo a unha estrutura inicial, facendo que sexa difícil a estrutura mínima global.

Así e todo, tamén hai outros métodos que non usan a aproximación de Born-Oppenheimer o que resulta en algoritmos onde se tratan os núcleos e os electróns coma un conxunto, o que non só é máis preciso senón tamén máis rápido.

Por iso Toyota desenvolveu un novo método cuántico para estudar a optimización de moléculas, que permite:

- Que as posicións nucleares optimizadas se especifiquen cun pequeno número de observacións (medidas cuánticas).

- Que a estrutura mínima global dos núcleos se obteña sen partir de ningunha estrutura inicial sofisticada e sen atascarse nos mínimos locais.

O método pode ser particularmente prometedor na procura da estrutura máis estable para sistemas con moitos isómeros (moitos mínimos locais), como grupos de aliaxes (de metal) [59].

### *Optimización de sinais de tráfico*

Optimizar unha cidade de maneira que minimize o tráfico e maximize o fluxo de vehículos é unha tarefa imposible para unha computadora clásica. Toyota, coa axuda da Universidade de Tokio e D-Wave, propuxo un método de *quantum annealing* e simularon o control das sinais de tráfico dunha cidade con 2500 interseccións controladas por semáforos que poden estar en verde ou vermello.

Ó pasar as interseccións, os automóbiles teñen a mesma probabilidade de xirar que de seguir recto e os semáforos téñense que adaptar dinamicamente ó tráfico e optimizalo de maneira fluída, para isto utilizouse a computadora cuántica D-Wave 2000Q.

Modelouse o problema como un modelo de Ising e o *quantum annealing* deu mellores resultados que o *annealing* clásico e os métodos de control locais [84] [85].

## **Ford**

### *Optimización de rutas para reducir o consumo de combustible*

Ford está explorando coa NASA a utilidade da computación cuántica para axudar ós propietarios de frota de vehículos comerciais a consumir menos combustible optimizando as rutas dos seus vehículos de reparto de diésel.

O seu traballo implica atopar a ruta óptima para un só vehículo de reparto que fai paradas en múltiples localizacións para realizar unha tarefa específica e despois aplicar isto a todos os vehículos.

Para isto están usando o ordenador cuántico localizado en Ames que comparten a NASA, Google e a Asociación de Investigación Espacial de Universidades que está baseado nun enfoque de *quantum annealing* [86].

## Denso

### *Control óptimo de vehículos guiados*

Denso ten robots portátiles para mover materiais en instalacións de fabricación e almacéns, que a miúdo noméanse como AGVs. Estes vehículos guiados automatizados, móvense ó longo de marcadores ou cables no chan ou usan visión, imáns ou láseres para a navegación.

Na actualidade, na maioría das fábricas, os transportes de materiais baséanse en AGV. Con todo, nas fábricas de tamaño limitado, os robots a miúdo están involucrados na conxestión do tráfico arredor das interseccións porque unha gran cantidade de AGV crúzanse simultaneamente.

Por esta razón necesitaban un sistema simple máis intelixente para controlar os AGV sen ningunha colisión. No control dos robots, a resposta rápida é necesaria para facer fronte a cambios instantáneos nun sistema.

Polo tanto optaron por resolver o problema utilizando o *quantum annealing* de D-Wave 2000Q e o *digital annealing* de Fujitsu, que poden proporcionar un método para establecer a infraestrutura futura para controlar AGV xa que son capaces de xerar solucións aproximadas nunhas poucas decenas de microsegundos.

Para lograr isto, modelaron o problema dos AGVs como un problema QUBO de optimización que busca maximizar os movementos dos robots mentres que minimiza as colisións entre eles.

Os resultados de D-Wave e de Fujitsu son bastante semellantes [87], aínda que actualmente os resultados poden cambiar debido ó aumento do número de cúbits nas dúas tecnoloxías.

## Shimizu e Mitsubishi

### *Optimización da recolección de residuos*

Groovenauts, empresa dedicada á cuántica, tiña un servizo que permitía a empresas utilizar intelixencia artificial de forma online chamado MAGELLAN BLOCKS. A principios de 2019 integrou un novo sistema neste servizo conectándoo ós sistemas de computación cuántica de D-Wave Systems. Grazas a esta integración Groovenauts axudou a compañías como Shimizu [88] [89] e Mitsubishi [90] [91] a optimizar a recolección de residuos.

A compañía recolleu datos durante tres anos sobre o lixo que produciron 26 edificios que pertencen a Mitsubishi Estate, recolleron información meteorolóxica como temperatura, humidade e precipitacións, ademais de ter en conta información sobre a área na que se encontraban os edificios. Finalmente optimizáronse as rutas dos camiós de recolección de residuos en base á información proporcionada e reduciron a distancia que necesitaban os camiós de recolección de residuos de 2296 km a 1004 km, ademais reduciron o porcentaxe de gases CO<sub>2</sub> emitidos nun 57% e o número de vehículos necesarios para a recolección nun 59%, reduciron tamén o número total de traballo nun 38%.

A maiores desta colaboración con Mitsubishi, Groovenauts traballou coa empresa Shimizu para optimizar a súa frota de camiós, que estaban involucrados nun proxecto de construción.

Usouse tecnoloxía GPS para rastrear o comportamento da frota de camiós de Shimizu, incluída a súa velocidade, o tempo de inactividade e o volume de terra transportada nunha ruta particular.

O sistema MAGELLAN BLOCKS posteriormente aplicou a información obtida a un marco de optimización, que identificou unha serie de rutas para unha frota de 40 camiós que na última instancia aumentarían a cantidade de lixo movido en aproximadamente un 10%.

Como beneficio adicional, o aumento da eficiencia tamén debería mellorar as condicións do tráfico local na área que rodea un sitio de construción e reducir emisións totais de CO<sub>2</sub>.

Esta non é a única oportunidade de colaboración entre as dúas empresas. Nunha entrevista recente con Groovenauts, Masakazu Yanagawa, líder do Grupo de Tecnoloxía Avanzada de Shimizu, sinalou que “aínda hai moitas áreas que requiren simulación en tempo real nas obras de construción” e prevé estender a tecnoloxía de Groovenauts a outros problemas difíciles como a xestión de custos e a maximizar a seguridade en sitios de construción.

## Hyundai

### *Recoñecemento de imaxe en automóbiles*

Hyundai, xunto coa empresa IonQ, propúxose realizar probas para automatizar procesos de recoñecemento automático de imaxe en vehículos autónomos [92]. Para comezar con esta tarefa, crearon un algoritmo que se puidese adestrar en simuladores cuánticos. Para isto dividiron o problema en dúas partes.

Por un lado, adestraron o modelo para recoñecer os tipos de sinais de tráfico a partir dunha biblioteca con 43 sinais diferentes.

Por outro lado, centráronse na detección automática de obxectos desde a perspectiva dun coche. Para isto, tratábase de distinguir o fondo dos diferentes obxectos da imaxe e determinar que tipo de obxecto é o detectado, analizando desta maneira os diferentes riscos para o condutor.

Non obstante, como a empresa comenta, non é posible introducir unha computadora cuántica nun automóbil en movemento. Así e todo, este tipo de investigacións permiten avanzar e investigar o software para cando os equipos a nivel hardware teñan a posibilidade de conseguir os obxectivos necesarios.

## Fujitsu

### *Optimización de rutas no porto de Hamburgo.*

As autoridades do porto de Hamburgo iniciaron un proxecto de innovación para o tráfico chamado MOZART para mellorar o fluxo de tráfico ó longo do porto. Esta iniciativa está en liña con outras iniciativas de ámbito internacional para intensificar o uso da computación moderna no control de sinais de tráfico.

O obxectivo non é só reducir os tempos de parada co motor en marcha, senón tamén evitar emisións nocivas. Ademais, ó minimizar as paradas, diminúe en consecuencia a probabilidade de colisións. Para levar a cabo este proxecto usouse tanto computación clásica de altas prestación cun HPC como o DA de Fujitsu.



Crearon un servizo chamado *Quantum-Inspired Optimization Service* (QIOS) que, a través de distintos sensores, recolle información sobre o tráfico e o simula nun xemelgo dixital. A continuación, grazas ó xemelgo dixital faise unha predición do tráfico e se transfírese ó *digital annealer* para optimizalo.

Este servizo permitiu mellorar os tempos medios de velocidade dos vehículos e proporcionou unha solución innovadora a un reto urxente de xestión do tráfico na área do porto [93].

### *Optimización da disposición dos estantes de pezas nun almacén.*

No proceso de fabricación dun produto, os traballadores dun almacén percorren os estantes para recoller as pezas necesarias. Con todo, dependen do seu propio coñecemento para atopar rutas eficientes para recoller as pezas, que non necesariamente son as máis óptimas.

O problema de optimizar a localización dos estantes pódese resolver colocando as pezas que deben recollese con alta frecuencia (fortemente vinculadas) nun estante próximo e colocando as pezas que deben recollese con baixa frecuencia (debilmente vinculadas) nun estante distante.

Consideraron un grafo no que as pezas son nodos e a frecuencia de recollida simultánea é o peso da aresta. O problema do corte máximo do grafo busca maximizar o peso das arestas restantes ó dividir o grafo en dous.

Como resultado, ó agrupar segundo a forza da correlación, propuxeron unha disposición optimizada das pezas e a distribución de estantes. Obtiveron como resultado que a distancia de viaxe por mes dos traballadores reduciuse de 25,001 m a 14,926 m. [94].

### *Asignación de traballadores.*

Este caso de uso consiste en realizar unha planificación e asignación de varios traballadores nas quendas de produción nunha compañía xaponesa de loxística.

Para cada quenda de traballo, a asignación faise de maneira manual levando moito tempo realizala e non se atopa a combinación óptima necesariamente.

Para automatizar este proceso transfórmanse as ecuacións que definen o proceso en QUBO e utilízase o *digital annealer* para procesalo. As ecuacións especificanse en

función de varias variables como o número de traballadores, os días da semana, o número de quendas... e se introducen dúas restricións. A primeira é a cantidade de traballo que hai que facer nun día e a segunda, que cada traballador necesita mínimo dous días libres. Posteriormente estas ecuacións transfórmanse ó sistema QUBO, no que cada variable ten que ter un valor de cero ou un, exceptuando as variables suplementarias que permiten outros valores.

Finalmente, como resultado realizouse a asignación de traballadores de forma automatizada, reducindo e axustando o número de traballadores necesarios para realizar as tarefas de 34 a 29, traballando 4 ou 5 días [94].

## Análise da información obtida

Nesta sección vaise analizar a información recompilada do Anexo A ó E deste documento. Esta análise permitirá obter unha visión máis completa da información proporcionada no estado da arte.

Antes de comezar coa análise e pese a que o obxecto deste estudo é buscar aplicacións para a computación cuántica no campo da industria automotriz, é importante resaltar que nos anexos pódense encontrar algúns casos de uso de industrias que non están relacionadas directamente coa automoción. Isto débese a que entre as posibles aplicacións desta tecnoloxía, algunhas son semellantes en diferentes industrias, e unha aplicación dun campo é posible levala a outro distinto.

Así pois, téñense casos de uso de empresas de diversas industrias, e dentro da propia industria automotriz atópanse empresas de diversos elos da cadea.

Os anexos pódense dividir en dous grupos, por un lado, os casos de uso nos que as aplicacións están actualmente en estudo ou xa foron realizadas e por outro, onde se propoñen aplicacións que poderán ser interesantes para levar a cabo coa computación cuántica nun futuro.

Para comezar, a análise centrarase no estudo do Anexo A, onde se expoñen as aplicacións en estudo, experimentación ou desenvoltas.

Respecto a estes casos de uso, hai empresas como Fujitsu ou Toshiba que desenvolven tecnoloxía cuantoinspirada. Os casos de uso destas empresas tamén se atopan no Anexo A e, por tanto, tamén se teñen en conta na análise a realizar.

Na Figura 1, pódense visualizar o porcentaxe de cada unha das catro clases de problemas existentes nos casos de uso. Como se pode observar, a área de

optimización é onde se conduciron ou levaron a cabo un maior número de estudos, seguido dos problemas abordados con aprendizaxe automática. Isto pode darnos unha idea da clase de problemas que se está a abordar na actualidade en maior medida.

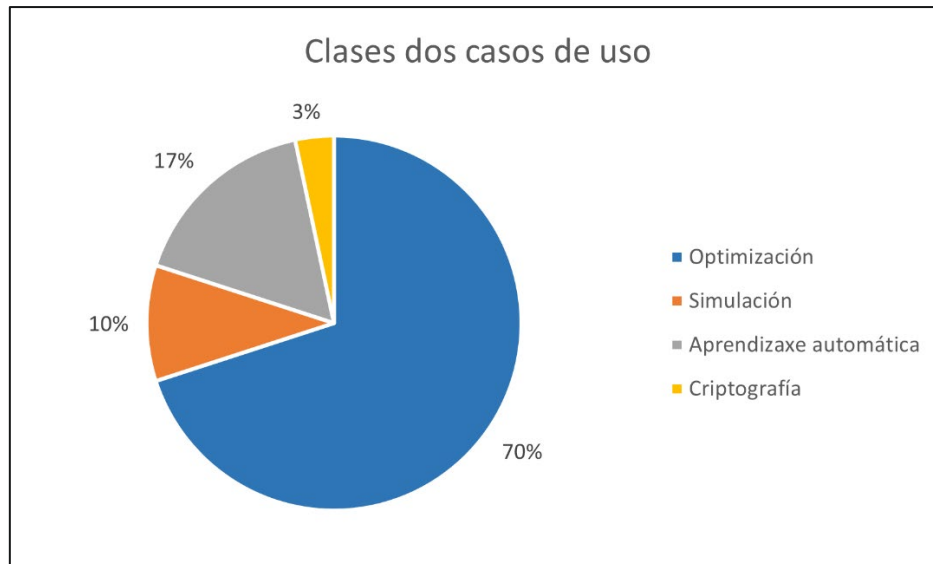


Figura 1.

A continuación procederase a revisar que empresas están investindo máis esforzos no ámbito da computación cuántica. Cabe destacar que as empresas que aparecen no Anexo A son aquelas que tomaron parte nas investigacións mais tamén empresas das que se utilizou a súa tecnoloxía, é dicir, empresas como D-Wave ou Fujitsu das que se utilizan as súas ferramentas cuánticas. Desta forma tamén se poden observar que tecnoloxías estanse a usar na actualidade a nivel cuántico.

Na Figura 2 pódese ver que a maioría de proxectos do Anexo A realizáronse da man de BMW e Volkswagen. Á súa vez, na Figura 3, pódense visualizar tanto as empresas de computación cuántica, que axudaron en diversas propostas ás empresas da Figura 2, como o seu número de proxectos con elas. Ademais, cabe destacar varias participacións. Por unha parte, na Figura 3 destaca a participación de D-Wave Systems, sendo a compañía dedicada exclusivamente á computación cuántica que ten o maior número de colaboracións. Esta empresa ten máis proxectos que os recollidos no Anexo, mais estes son unha mostra representativa de que ten un maior número de colaboracións en comparación con outras empresas e grupos do sector. Por outra parte, tamén na Figura 3, atópase Fujitsu, que aínda que é unha empresa que non só se dedica á cuántica, está a centrar bastantes dos seus esforzos neste campo e

incluso, nos casos de uso estudados, ten resultados similares ós que ofrece o *quantum annealing* de D-Wave.

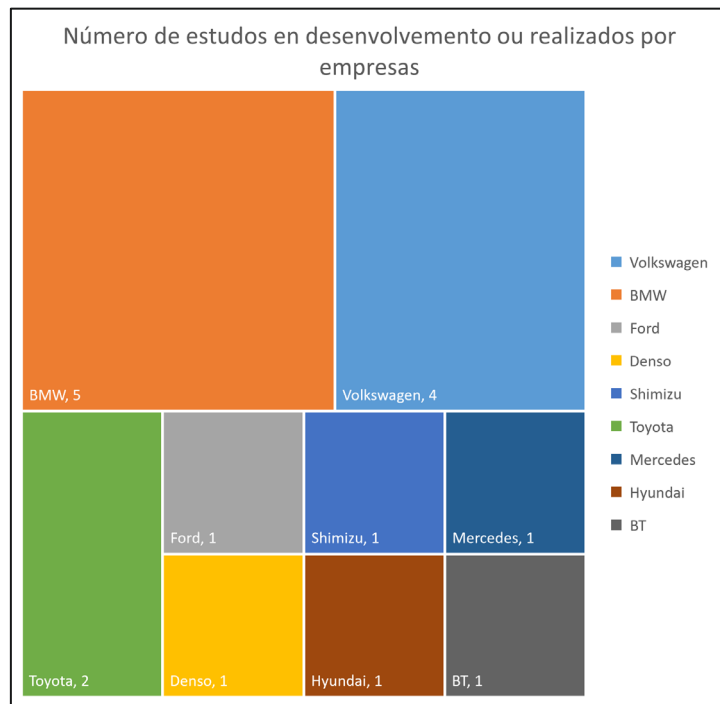


Figura 2.

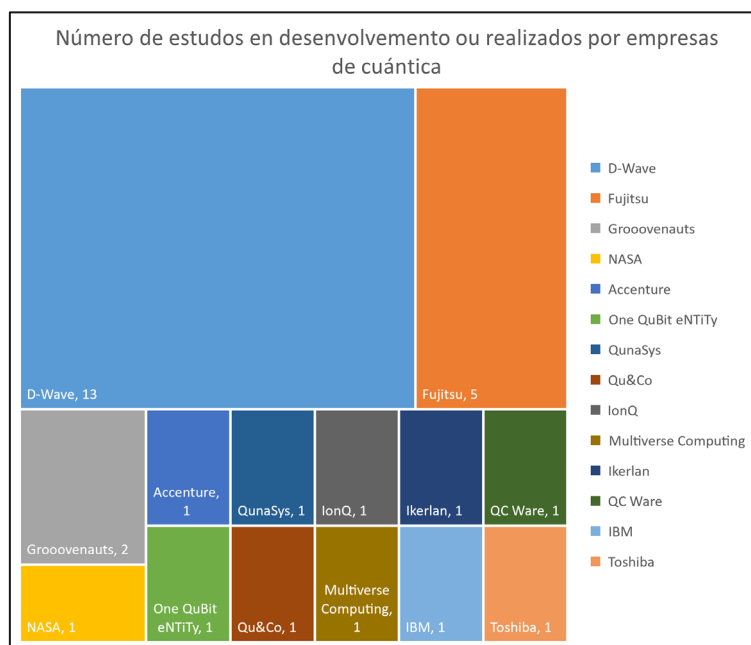


Figura 3.

Respecto ós casos de uso futuros que se atopan nos Anexos B, C, D e E, pódese obter información sobre as aplicacións da computación cuántica nun futuro.

Segundo os estudos realizados polo QUTAC, a clase de problemas nos que a computación cuántica vai ter maior importancia son os problemas de optimización. Con todo, a diferenza do visto ata agora, despois da optimización, os problemas con maior peso serán os relativos á simulación.

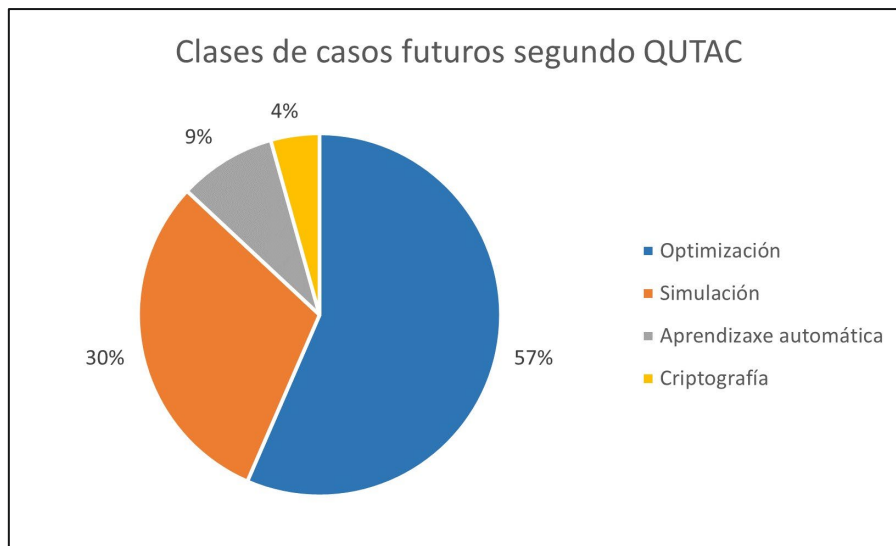


Figura 4.

Nos estudos realizados por BCG, pódese observar que o maior potencial poderíase atopar na simulación. Igualmente, os casos de optimización mantéñense case tan altos coma os de simulación.

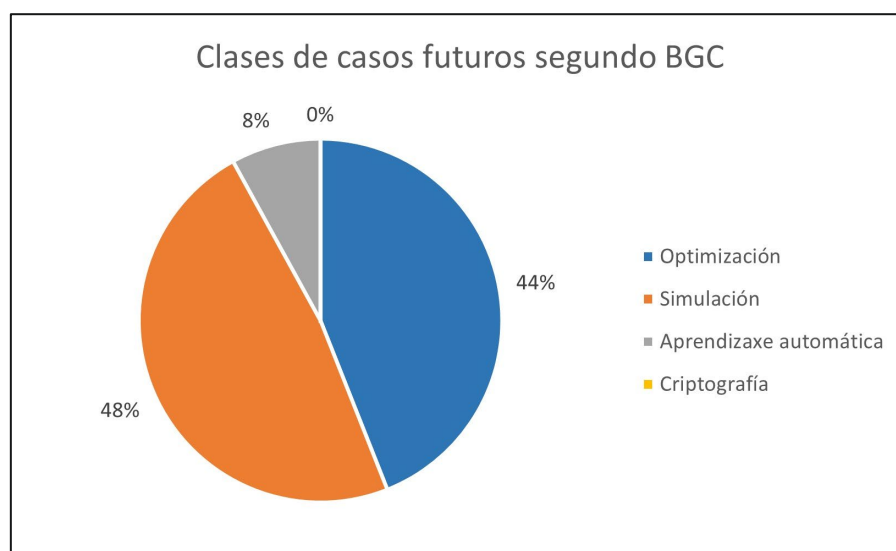


Figura 5.

Grazas ás Figuras 1, 4 e 5 pódese facer unha comparación entre as clases de problemas que teñen unha maior importancia no presente e as posibilidades no

futuro. Segundo estes estudos, semella que os problemas de optimización seguirán a ter unha grande importancia dentro do mundo cuántico. Así e todo, nun futuro terán unha maior forza, en comparación coa actualidade, os problemas de simulación.

A maiores destes datos analizados nas gráficas tamén se teñen outros anexos nos que se da información sobre posibles casos futuros, analizando outros parámetros como as diferentes eras ou etapas segundo o tempo de desenvolvemento da tecnoloxía.

No Anexo C pódense ver os casos de uso recompilados por BMW, estes clasifícanse en 4 tipos segundo a súa formulación matemática e os seus algoritmos de resolución: optimización, dinámica molecular, dinámica de fluídos e visión e procesado da linguaxe corporal. A continuación, vanse explicar brevemente as aplicacións das táboas.

Na Táboa 7, as aplicacións pertencen ós tipos de problemas da lista de Karp, que se poden formular como problemas QUBO, PUBO ou de grafos e a súa solución cuántica vén dada por QAOA, o algoritmo cuántico adiabático e o algoritmo de Grover.

Na Táboa 8 atópanse problemas de dinámica molecular, que se poden formular como transformacións de Jordan-Wigner, mapeados de Bravyi-Kitaev e codificacións de paridade e a súa solución cuántica vén dada polos algoritmos QPE e VQE.

A Táboa 9 contén problemas de dinámica de fluídos, simulacións de choques e deseño de estruturas que se poden formular como grupos de ecuacións diferenciais ou sistemas de ecuacións lineais e a súa solución cuántica vén dada polo algoritmo Harrow, Hassidim e Lloyd (HHL) e circuítos cuánticos diferenciais.

Por último, na Táboa 10, son problemas de visión e procesado da linguaxe natural que se poden formular utilizando espazos de Hilbert e a súa solución cuántica vén dada por VQC, métodos Kernel e QNN.

Como se pode ver, unha gran cantidade das aplicacións estudadas pertencen á Táboa 7, as cales na súa totalidade son problemas de optimización.

Finalizando, no Anexo D, revistas de índole científico como McKinsey dividen os casos de uso en tres eras: a era NISQ, a era de dispositivos cuánticos con corrección de erros e a era de dispositivos cuánticos universais. A era NISQ na que está na actualidade a computación cuántica contempla, principalmente, aplicacións para optimización. Por outro lado na era media e tardía, ademais dos problemas da era NISQ, poderanse abordar outros de interese, como simulación, aprendizaxe automática e criptografía.

## 4. Entrevistas ó sector da automoción

Unha vez avaliado o estado da arte da tecnoloxía, o obxectivo desta sección é a identificación do estado de coñecemento, preparación e interese do sector de automoción galego de cara a unha futura explotación da tecnoloxía. Este estudo consistiu na 1) identificación dos actores obxectivo do sector, 2) a preparación de contidos que apoiasen as interaccións cos devanditos actores, 3) a realización de entrevistas, 4) a recompilación dos resultados e a interpretación e análise dos mesmos, e 5) a extracción de conclusións globais do sector.

A continuación vanse revisar os materiais aportados durante a investigación na área de contacto coas empresas e a metodoloxía seguida. Estes materiais constan dunha presentación e un cuestionario. Posteriormente, analizaranse os resultados das respostas obtidas durante as entrevistas. Cabe destacar que estes dous documentos realizáronse en castelán xa que algúns dos nosos interlocutores non falan galego e fíxose desta maneira para facilitar a canle de comunicación.

### Presentación

En primeiro lugar realizouse unha presentación. Con isto pretendíase acercar a computación cuántica ás empresas de forma que puideran entender dunha forma máis clara en que consiste e para que se utiliza esta tecnoloxía. A continuación, explicaranse os apartados da presentación e por que se decidiu realizala deste modo.

A primeira parte presenta a computación cuántica. Durante este apartado preténdese presentar información básica sobre a computación cuántica, onde se explica de maneira breve que son os *cúbits* e como interactúan. De igual forma explícanse as vantaxes da computación cuántica e o cambio de paradigma que se necesita á hora de utilizar este tipo de tecnoloxía. Por último, introdúcese o CESGA como medio de conseguir a infraestrutura necesaria para traballar con computación cuántica.

Durante a segunda parte da presentación introdúcense os tipos de casos de uso (véxase a Sección 3.1.5). Cabe destacar que a parte de optimización dividiuse en tres partes: *scheduling*, rutas e *nesting*. Esta partición realizouse coa intención de facilitar a comprensión do lector e acercar o caso de uso ós entrevistados. Ademais, nestes

apartados, preséntanse diferentes exemplos para aclarar en que consiste cada tipo de uso. Desta forma preténdese esquematizar a información para facela máis accesible á vez que se utilizan exemplos que poidan axudar ás empresas a pensar nos seus posibles casos de uso.

Da Figura 6 á 31, achéganse as diapositivas presentadas.



Figura 6.

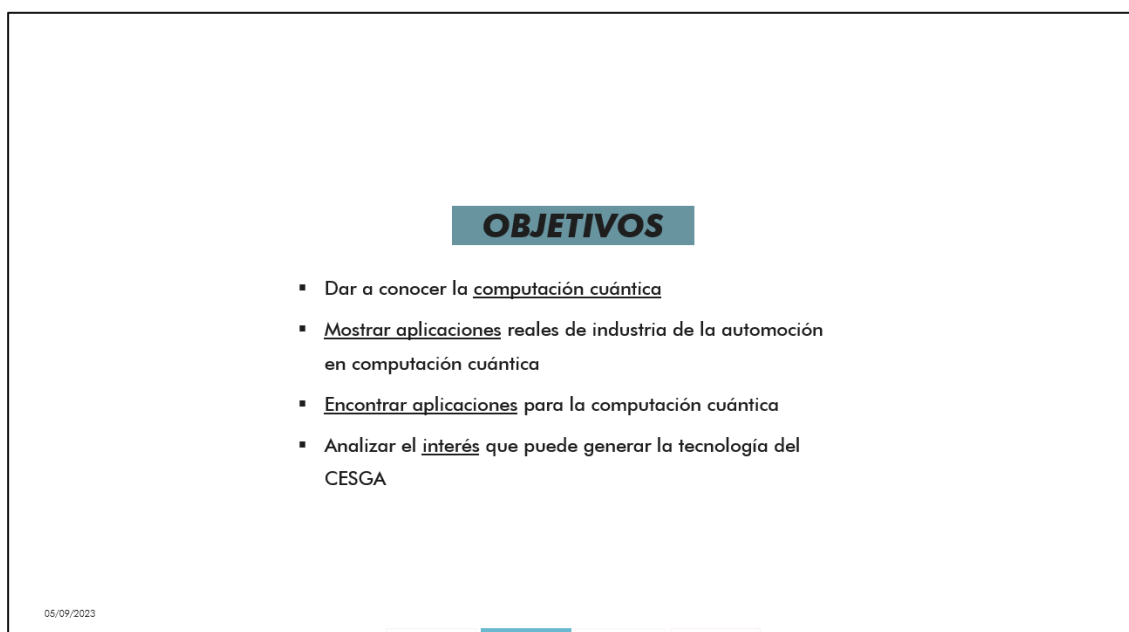




Figura 7.



Figura 8.

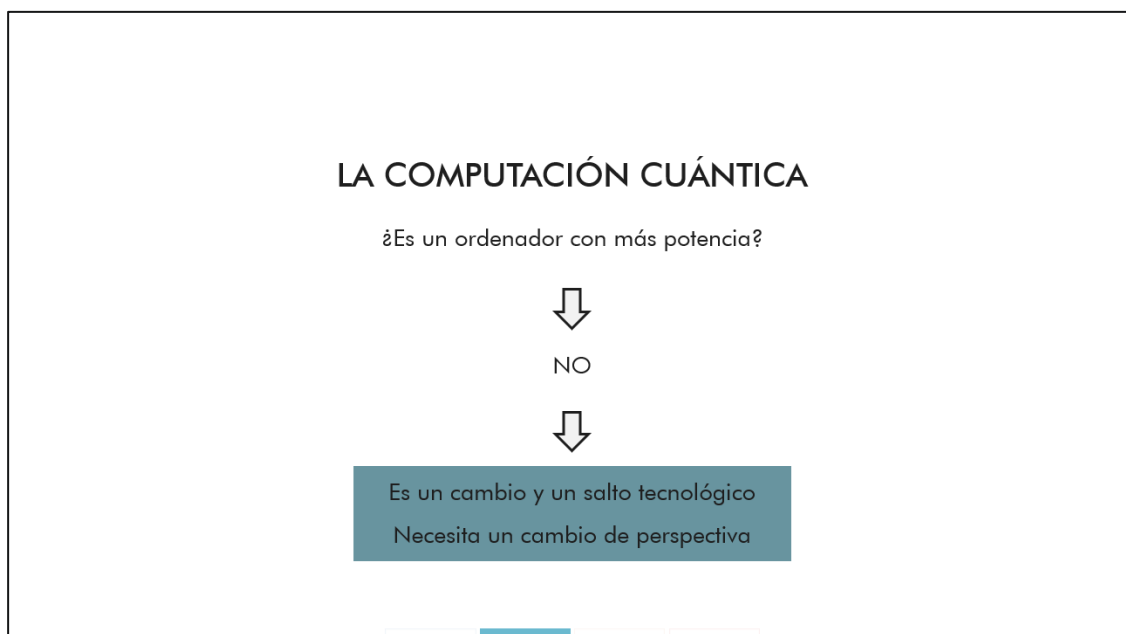



Figura 9.


## ¿QUÉ ES LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA?




- Nueva tecnología
- Base del funcionamiento → cúbits
  - Características
    - Superposición
      - Fluctúan entre estados hasta alcanzar un valor final
    - Entrelazamiento
      - Pueden ligarse unos a otros afectándose entre sí
        - Permitiendo un comportamiento en grupo
        - Mientras se mantiene su valor individual
  - Nuevos algoritmos

**Bit**  
(Classical Computing)

0




1



**Qubit**  
(Quantum Computing)

0

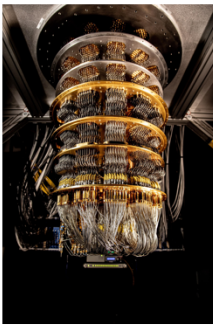


1

INTERNAL

Figura 10.

## NUEVO PARADIGMA



Erik Lucero, Google Quantum AI

- Google consiguió en 2019 muestrear la salida de un circuito cuántico creado aleatoriamente:
 

Cálculo ordenador clásico  
10000 años


→

Cálculo ordenador cuántico  
3 minutos y 20 segundos
- Estas ventajas conllevan un cambio de paradigma
  - Cambio en los algoritmos
    - Reprogramación
    - Profesionales capacitados
  - Uso de computadores cuánticos
    - Necesidad de una nueva infraestructura


INTERNAL

Figura 11.

## VENTAJAS




- Principales ventajas
  - Capacidad de resolución de problemas de múltiples combinaciones
  - Problemas
    - Iguals o mejores soluciones
  - Reducción
    - Tiempo
    - Recursos
    - Energía




INTERNAL

Figura 12.


## INFRAESTRUCTURA



- Esta tecnología es posible llevarla a la práctica
- Existen varios superordenadores actualmente en España
  - Uno de ellos
    - CESGA



CESGA (Centro de Supercomputación de Galicia)



```
graph LR; Galicia[Galicia] --> CESGA["CESGA (Centro de Supercomputación de Galicia)"]
```

INTERNAL

Figura 13.



Figura 14.



Figura 15.

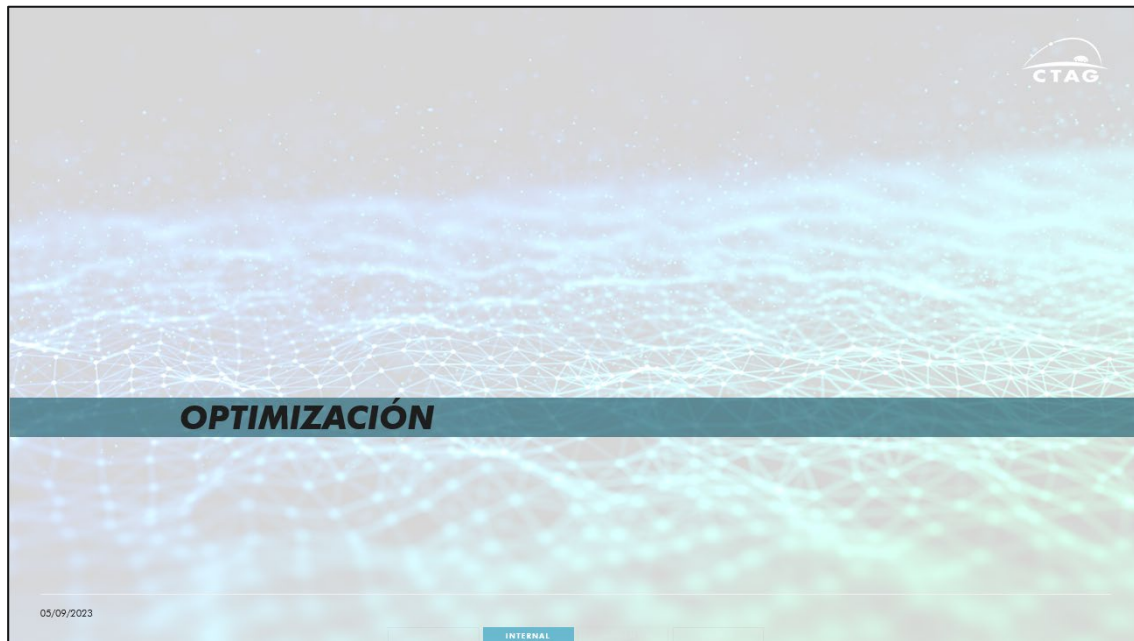
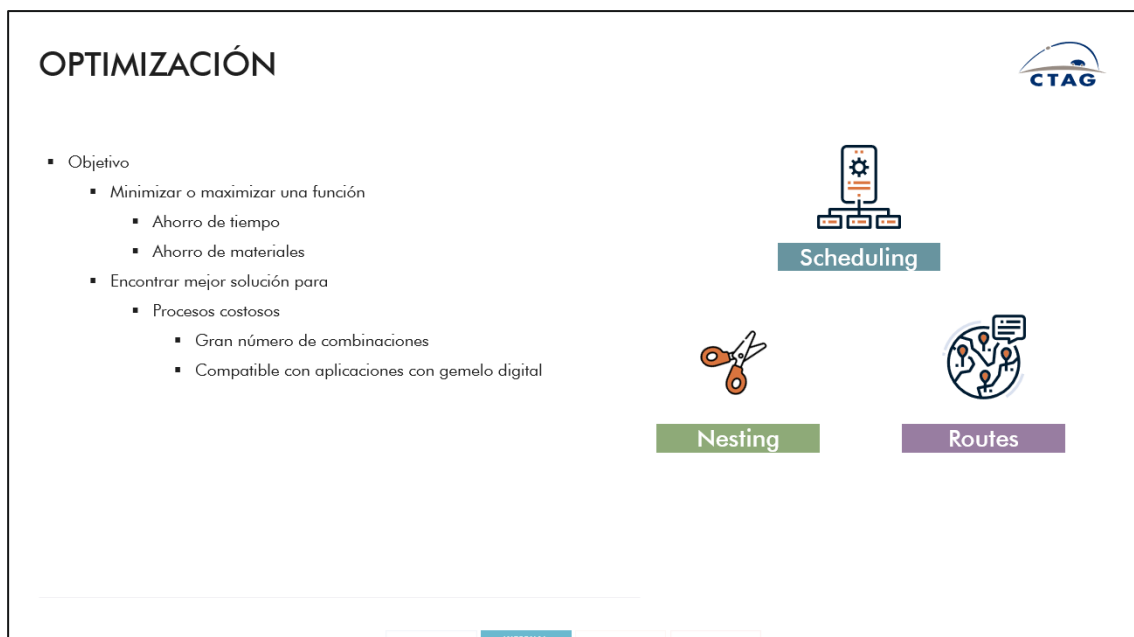





Figura 16.



A presentation slide titled "OPTIMIZACIÓN" with a white background and CTAG logo in the top right. The slide contains a list of objectives and three icons with labels:

- Objetivo
  - Minimizar o maximizar una función
    - Ahorro de tiempo
    - Ahorro de materiales
  - Encontrar mejor solución para
    - Procesos costosos
      - Gran número de combinaciones
      - Compatible con aplicaciones con gemelo digital


Below the list are three icons with labels in colored boxes:

-  Scheduling
-  Nesting
-  Routes

At the bottom center, the word "INTERNAL" is written on a small teal bar.

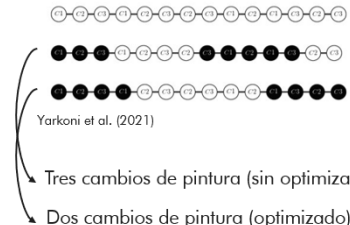
Figura 17.

## OPTIMIZACIÓN: SCHEDULING



- Organización de un gran número de combinaciones
  - Solo algunas son válidas
  - Gran número de cálculos
    - Del orden de millones o incluso billones
  - Mucho tiempo de computación
  - Maximizar número de piezas en un proceso productivo
  - Minimizar el tiempo de paro de máquinas

- Volkswagen
  - Coloreado de piezas en un taller de pintura
    - Llegada de las piezas desordenada
    - Capa base de color blanco o negro
  - Los algoritmos cuánticos mejores resultados
    - Tanto para pequeña escala (10-100 automóviles)
    - Como para gran escala (300-3000 automóviles)



Yarkoni et al. (2021)


Tres cambios de pintura (sin optimizar)

Dos cambios de pintura (optimizado)

INTERNAL

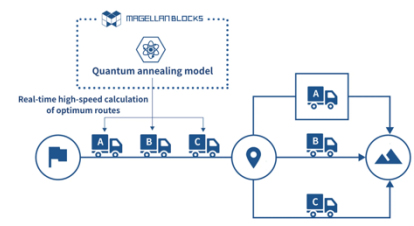
Figura 18.

## OPTIMIZACIÓN: RUTAS



- Búsqueda del camino más corto
  - Gran número de combinaciones de rutas
  - Paso por todos los lugares y regreso sin repetir paradas
    - Reducir distancia
    - Reducir tiempo
    - Reducir congestión

- Groovenauts y Mitsubishi
  - Optimización de ruta de camiones de recolección de residuos
    - Recorrido de 2296 km a 1004 km
    - Reducción de gases del 57%
    - Reducción de vehículos del 59%
    - Reducción del trabajo del 38%




Groovenauts, Inc. (2022).

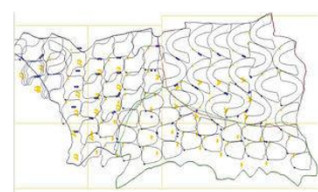
INTERNAL

Figura 19.

## OPTIMIZACIÓN: NESTING



- Máximo aprovechamiento de un material
  - Gran número de combinaciones según
    - Material base
      - Forma
    - Pieza a obtener
      - Rotación
      - Tamaño
      - Colocación
  - Objetivo
    - Búsqueda del corte más eficiente



Guevara-Palma et al. (2015)

INTERNAL

Figura 20.

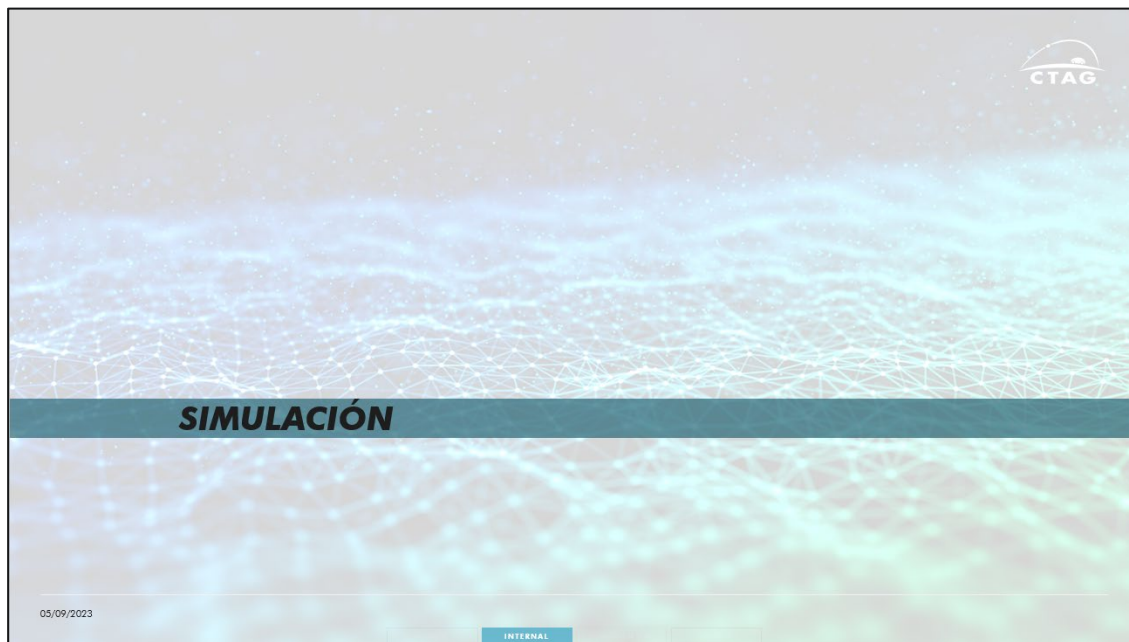



Figura 21.



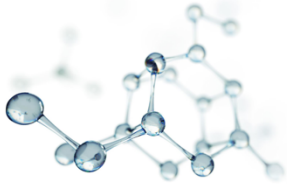
Figura 22.



## SIMULACIÓN




- Simulación de deformación de material durante producción
  - Predicción propiedades material durante la preproducción
  - Modelo numérico del proceso
  - BMW con Qu&Co
- Simulación de moléculas para desarrollo de baterías
  - Estudio de mejora de eficiencia para baterías de alto rendimiento
  - Estudios por empresas como Mercedes-Benz, BMW, Toyota y Volkswagen



INTERNAL

Figura 23.




## APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

05/09/2023


INTERNAL

Figura 24.


## APRENDIZAJE AUTOMÁTICO



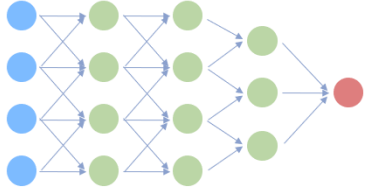
- Análisis de datos
  - Búsqueda de características
    - Reconocimiento de patrones
  - Menor tiempo
  - Más detalle en los datos de imagen



Inspección visual




Clasificación de objetos



INTERNAL

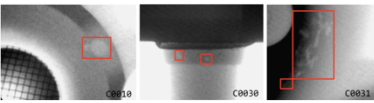
Figura 25.

## APRENDIZAJE AUTOMÁTICO



- Reconocimiento de imagen en automóviles
  - Reconocimiento de señales de tráfico (QML)
  - Predicción de objetos
    - Localización (bounding boxes) y descripción de objetos relevantes (persona, animal, coche...)
  - Hyundai y IonQ

- Evaluación de calidad automatizada en piezas de automóviles
  - Multiverse Computing con Ikerlan
  - Mejor precisión e inferencia, incluso reduciendo la resolución de las imágenes



Guijo, D. et al. (2022)

INTERNAL

Figura 26.

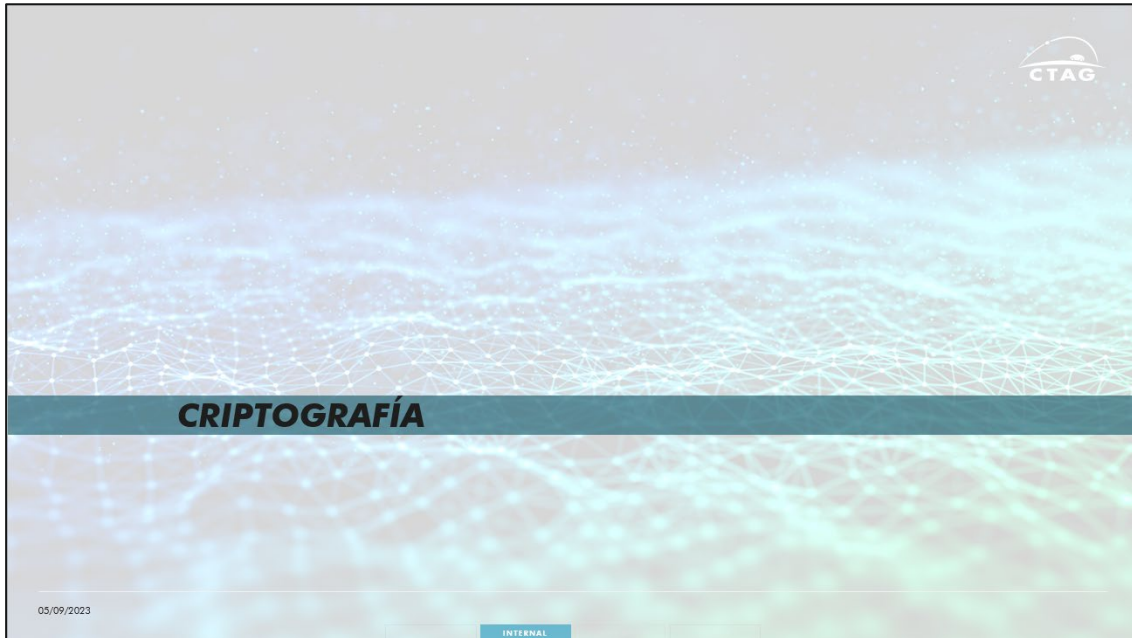


Figura 27.

## CRIPTOGRAFÍA

- Objetivo
  - Garantizar las comunicaciones
- Actualmente
  - RSA
    - Basada en la incapacidad de factorización
- Cuántica puede descifrar claves clásicas
  - Capacidad de factorización
- Basa su seguridad en
  - Teorema de no clonación

Mantener la seguridad de los equipos

Mantener la seguridad de las plantas de producción

INTERNAL

Figura 28.

## CRIPTOGRAFÍA

- Red segura de comunicaciones
  - Universidad de Vigo y el CESGA, en Santiago de Compostela
  - Distribución de claves cuánticas
    - Implementado sobre fibra óptica

Noticias CESGA

- Distribución de claves cuánticas
  - Toshiba y BT
  - Primera red segura de comunicaciones Quantum-Secured Metro Network (QSMN)
    - Implementada sobre fibra óptica
    - Ya cuenta con clientes (Ernst & Young)

Revista TheRegister

INTERNAL

Figura 29.

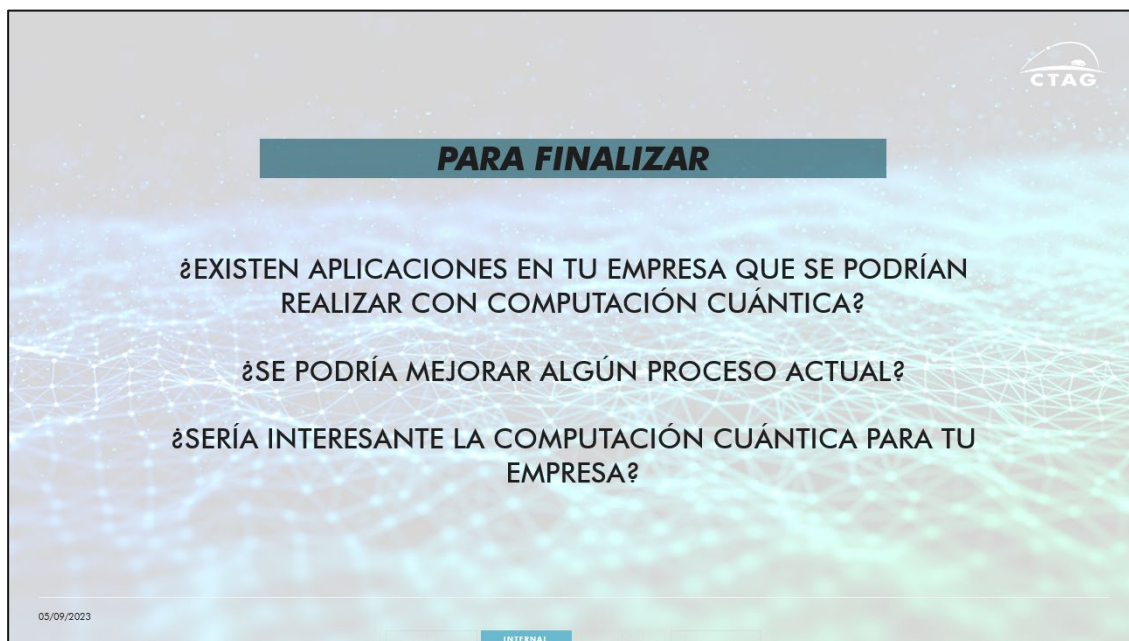


Figura 30.



Figura 31.

## Cuestionario

Tras a presentación, realizóuselles unha entrevista a varias persoas para recoller información e obter tanto o seu punto de vista sobre esta tecnoloxía como posibles casos de uso. Para isto, formuláronse unha serie de preguntas onde debían responder a cuestións relacionadas co tipo de problemas que teñen nas súas respectivas empresas para que pensasen que tarefas poden desenvolver ou mellorar utilizando a computación cuántica.

Algunhas destas preguntas eran de libre resposta e, outras, de resposta numérica, de forma que se puidese analizar de mellor forma as contestacións, sen deixar de lado o que puideran aportar os interlocutores de maneira máis fluída.

As preguntas de resposta aberta foron as seguintes:

- Existe algún proceso na túa empresa no que se invista moito tempo ou sexa pouco eficiente? Cal? Cres que poderías utilizar a computación cuántica neste caso?
- Identificaches algún caso de uso ó que aplicar a computación cuántica? Cal/Cales?
- En que área ves máis probable que axude a computación cuántica á túa empresa? (Optimización, simulación, aprendizaxe automática, criptografía ou outra)
- Que consideras que é o máis atractivo da computación cuántica para a túa empresa? (Exemplo: velocidade de cálculo, capacidade de abordar problemas complexos, vantaxe competitiva, etc.)
- Detectas algún inconveniente á hora de implantar a computación cuántica na túa empresa? Cal?
- Que aspectos cres que poderían ser barreiras para a adopción da computación cuántica na túa empresa? (Exemplo: custos, falta de coñecemento, incerteza, etc.)
- Consideraches a inversión en formación e capacitación para que os teus empregados estean preparados para utilizar a computación cuántica nun futuro próximo?
- Consideraches anteriormente algunha colaboración con institucións de investigación ou empresas especializadas en computación cuántica para

facilitar a adopción desta tecnoloxía na túa empresa? En caso negativo, reconsideraríalo?

- Considerarías implementar a computación cuántica a curto prazo? E a longo prazo?
- Considerarías realizar un test piloto utilizando este tipo de tecnoloxía?

Despois, preguntóuselles o grado de acordo ou desacordo ante algunhas das afirmacións, puntuando do 1 ó 5 (1 nada ou en desacordo e 5 moito ou moi de acordo):

- Canto estás familiarizado co concepto de computación cuántica?
- Canto coñecemento teñen os teus equipos sobre a computación cuántica e a súa potencial aplicación na industria?
- Cal é o nivel de probabilidade de que implementes algún caso de uso de computación cuántica nos próximos anos?
- Cres que a computación cuántica podería ter un impacto significativo no ámbito empresarial?
- Canto che interesa o uso da computación cuántica para resolver problemas na túa empresa?
- Como de interesado estás en contar con tecnoloxía cuántica?

Por último, tratouse de puntuar do 1 ó 5 (1 nada ou en desacordo e 5 moito ou moi de acordo) sobre as clases de problemas e a participación que cren que podería ter a computación cuántica nos seus respectivos problemas:

- En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a optimización de procesos na túa empresa?
- En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a simulación de procesos na túa empresa?
- En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a aprendizaxe automática na túa empresa?
- En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar os procesos criptográficos na túa empresa?

Finalmente, coa información recadada grazas ás preguntas e ás impresión dos diferentes contactos coas empresas realizarase unha análise con estes datos.

## Resultados das entrevistas

Despois de presentar a información ás diversas empresas e de recadar as respostas obtivéronse os resultados expostos nesta sección.

Os resultados obtidos das entrevistas atópanse no Anexo F. Cada táboa do anexo presenta unha entrevista para facilitar a súa lectura e nelas pode verse un resumo das respostas obtidas xunto ás respostas numéricas.

Os entrevistados nas enquisas corresponden a persoas traballadoras do sector da automoción de distintas empresas e áreas. Así e todo, poden dividirse en dous grupos, por un lado as persoas que traballan en empresas de produción do sector (OEM, Tier1...) e por outro, aquelas persoas que traballan en entidades que apoian e dan servizos de asesoría ou enxeñería ás empresas do sector. Ambos tipos de empresas son de utilidade nesta investigación, aportando diferentes perspectivas. No primeiro caso, atópanse máis preto do produto final e por tanto enfróntanse a problemas máis relacionados con el, teñen unha visión moi centrada no produto e o que o rodea. No segundo caso, son empresas que tratan con outras moitas polo que contan cunha visión máis xeral e ampla do sector. As do primeiro grupo serían as entrevistas 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 12 e 13 mentres que as do segundo son a 1, 5 e 7.

As reaccións das entrevistas déixannos ver a visión e a aproximación das empresas, moitas veces por primeira vez, á computación cuántica. Nalgúns casos, aínda que non se entendía a computación cuántica nin o que conleva, os entrevistados coñecían os seus problemas e os procesos do seu traballo nos que se poden dar embotellamentos ou que non son todo o eficaces que poderían ser. Noutros casos, os entrevistados eran capaces de entender as utilidades desta tecnoloxía, e aportaban ideas de cara ó futuro de como mellorar as súas tarefas e incluso outras dentro do sector.

Cabe destacar que cada entrevista foi diferente dependendo do interlocutor, nalgúns casos respondían de maneira máis libre mentres se lles guiaba seguindo as preguntas, mentres que outras persoas respondían de forma máis cinguida. Desta



maneira, os entrevistadores intentaban adaptarse á forma de responder de cada entrevistado.

## Discusión dos resultados

### *Casos de uso*

Polas respostas, pódese observar que todas as empresas entrevistadas coñecen ou teñen procesos produtivos que son pouco eficientes ou nos cales se perde moito tempo, sobre todo, planificando a produción, equilibrando liñas produtivas e facéndolle fronte a avarías, entre outros problemas de diversa índole. Polo tanto, nestas respostas, existen ideas comúns que se repiten e axudan a mellorar estes procesos, que se verán a continuación e que se encontran recollidos na Figura 32.

Un dos casos de uso máis comentados tanto de forma principal como secundaria foi a **optimización da planificación**. A idoneidade do uso da computación cuántica neste caso é que a planificación de tarefas na computación actual necesita moito tempo debido ó gran número de combinacións. Para reducir estas combinacións, á hora de resolver estes problemas coa computación clásica, necesítanse usar certo número de restricións, para poder obter un resultado nun tempo útil e razoable. En contra disto, o ideal sería poder desfacerse destas restricións e implementar o algoritmo con todos os datos necesarios para obter a solución óptima, nun tempo igual ou, preferiblemente, menor, no caso máis semellante á realidade.

Outra aplicación na que pode haber melloras é o **control de calidade**, este proceso é fundamental á hora de mellorar o produto final e atópase na meirande parte das empresas, polo que é un punto de interese para a maioría delas. A mellora deste proceso pode aforrar diferentes custos. Por exemplo, pulir o control de calidade pode mellorar a capacidade de detección de erros nos produtos e a aceleración desta detección, resultando nun menor número de produtos defectuosos fabricados. Unha das técnicas utilizadas a día de hoxe para o control de calidade é a aprendizaxe automática.

A maiores, outro caso de uso que teñen en conta algunhas empresas é a capacidade de monitorizar procesos en **tempo real** grazas á capacidade e velocidade de cálculo. Isto podería permitir detectar rapidamente **situacións imprevistas** e ter á capacidade de reaccionar ante elas no momento, optimizar recursos ante cambios na produción ou permitir melloras en aplicacións de **xemelgo dixital**.

Por outro lado para os entrevistados sería interesante mellorar ou ter a capacidade de facer **probos e simulacións de diferentes materiais e compoñentes** debido a que isto lles permite coñecer o comportamento dunha peza ante diferentes esforzos. A capacidade de poder ver como afecta o proceso é interesante para evitar utilizar demasiados prototipos ou para evitar situacións de proba e erro que necesitan de máis presuposto e tempo tanto para construílos como para probalos.

Un caso tamén importante é a **optimización do almacén**, a súa disposición física pode afectar na eficiencia das operacións. A computación cuántica pode analizar diferentes deseños de almacén e disposicións de andeis para maximizar o espazo de almacenamento e minimizar as distancias de viaxe dos traballadores e máquinas.

Outro punto en común é a **mellora das rutas de transporte**, cuestión moi relacionada co primeiro caso debido a que ten que ter en conta a planificación, tamén foi un tema atractivo para moitos dos entrevistados. Os traslados, tanto de forma interna co movemento dos compoñentes dun lugar a outro, como de forma externa coa distribución mediante diferentes medios de transporte, realízanse na maior parte das empresas polo que a súa optimización pode resultar nun aforro de custos, tempo e emisións notable.

Ademais de todos estes casos de uso a **mellora do proceso de nesting** tamén xurdiu como caso de uso nalgunhas entrevistas, as melloras neste campo poden resultar nun aforro significativo de materiais e outros custos de produción.

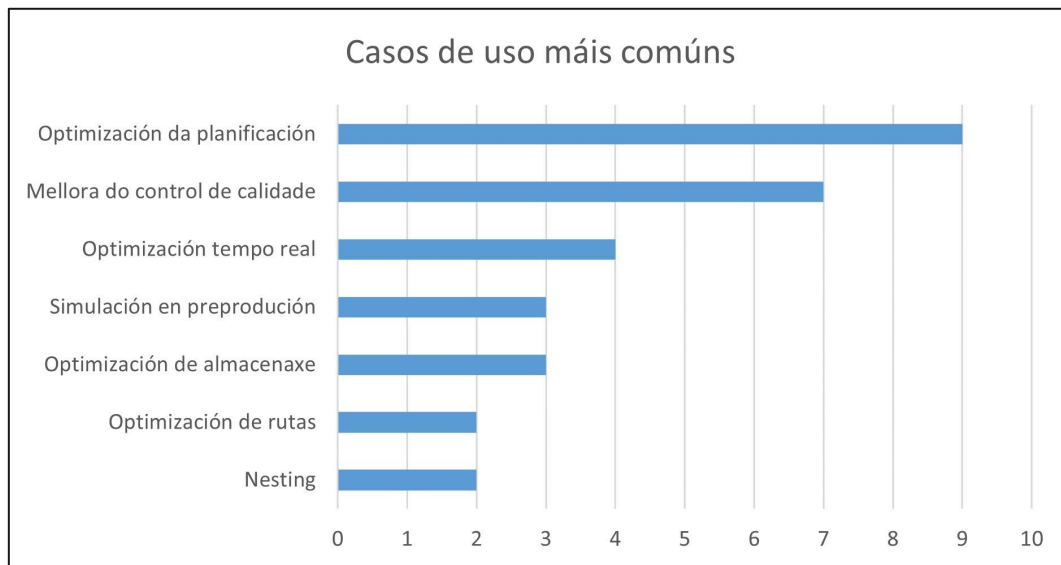


Figura 32.

### *Vantaxes e inconvenientes*

A maiores dos diferentes casos de uso, apareceron respostas semellantes noutras preguntas. Estas respostas abarcan diferentes contidos, por unha parte preguntouse acerca do atractivo da computación cuántica e por outro lado acerca dos inconvenientes e barreiras que poden aparecer no seu uso, estas respostas están recollidas tamén nas Figuras 33 e 34 respectivamente.

Comezando polas respostas sobre as vantaxes da computación cuántica, moitas das empresas estaban de acordo en que unha das máis importantes é a **velocidade de cálculo** que é capaz de ofrecer en comparación coa computación clásica. Esta aceleración de cómputo permite unha maior **velocidade de resolución en problemas con cálculos moi longos e complexos**. Ademais, se se eliminasen as restricións actuais que adoitan ter este tipo de problemas, os tempos de cálculo serían inabarcables desde a computación clásica, isto convértese nun gran incentivo á hora de usar tecnoloxía cuántica, grazas a súa velocidade, conséguense grandes **reducións de tempo** nos tipos de problemas citados anteriormente.

A outra vantaxe máis comentada, está directamente relacionada coa anterior, é o **tratamento de problemas complexos**. Os casos de uso propostos polas empresas son tarefas complexas cunha gran cantidade de combinatoria que moitas das veces non son capaces de levar a cabo coa computación existente.

Finalmente, outra vantaxe que se comentou en varias entrevistas é a **vantaxe competitiva**. Poder obter acceso a sistemas cuánticos que permiten acelerar procesos

ou resolver problemas máis complicados pode supoñer un distanciamento fronte a outros competidores.

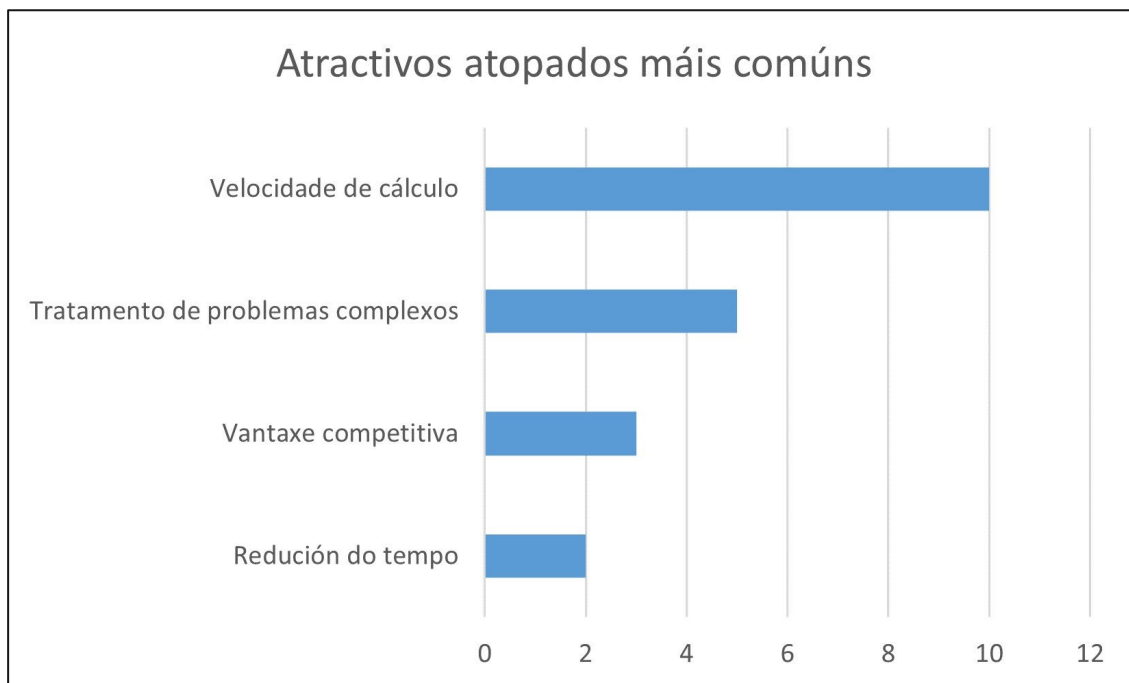


Figura 33.

Coma se comentaba, nas entrevistas tamén se falou dos inconvenientes que pode ter a instauración desta nova tecnoloxía. É importante resaltar algúns nos que as empresas tiveron respostas en común.

Unha das cuestións máis comentadas foron os **custos** como barreira a implementar a tecnoloxía. Se os custos de uso son elevados ou maiores que en solucións clásicas é complicado para as empresas engadir a cuántica ós seus procesos. Por outro lado, o descoñecemento destes custos, e non saber o que supón a súa implementación, ocasionalles inseguridade ás empresas.

Outra cuestión que destacou en varias entrevistas foi a **integridade e a confidencialidade** da información. Se as empresas non teñen a infraestrutura necesaria para desenvolver algoritmos cuánticos, teñen que contar cunha entidade externa que faga os cálculos por elas, polo tanto, teñen que levar a información dalgunha maneira a esa entidade. Varios dos entrevistados estaban preocupados sobre **como levar os datos de forma segura a ese organismo externo**, e, unha vez se envíen, as condicións para o uso dos datos tamén sería un asunto a ter en conta.

Ademais, actualmente a cuántica é un tema moi novo e por tanto, outra das desvantaxes máis repetidas foi a da **necesidade de contratar persoal especializado** ou de ofrecer unha **formación** específica sobre este tema. Cabe destacar que esta desvantaxe nace da incerteza das empresas, mais non é demasiado relevante xa que non se necesita facer este tipo de contratacións ó colaborar directamente con entidades especializadas.

Outros inconvenientes que se mencionaron foron o **descoñecemento xeral** por parte das empresas sobre o tema e as **dificultades internas** para comezar proxectos de investigación novos, ademais da incerteza ante como obter **acceso** a esta nova tecnoloxía e mediante unha **comunicación constante** en caso de ter que utilizala unha vez ó mes, á semana ou en casos de uso en tempo real.

Finalmente, ó ser un sector industrial competitivo, xurdiu a problemática de ter un **retorno de inversión** que non fora moi a longo prazo para poder recuperar o capital investido. As empresas necesitan saber se o capital que invisten nun proxecto ten un retorno seguro e un beneficio a partir del, ou saber se contan con **financiación externa** para realizar probas. Senón, pode ser máis interesante para elas seguir con métodos tradicionais.

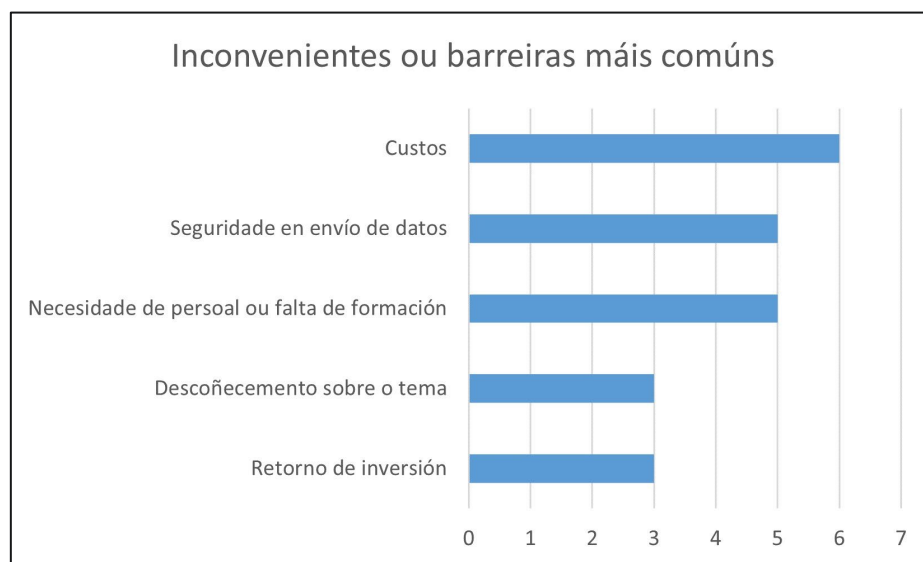


Figura 34.

Pese a todos estes inconvenientes, e pese a que os entrevistados anteriormente non consideraran levar a cabo ningún proxecto de computación cuántica para a realización de casos de uso, moitos deles, reconsiderarían. Ademais, a meirande

parte implementaría algún caso de uso a curto prazo e os demais a medio ou longo prazo. Tamén cabe destacar que á gran maioría deles gustaríalles colaborar para realizar un test piloto con esta tecnoloxía.

### *Respostas individuais salientables*

É interesante analizar as respostas comúns dentro das entrevistas porque moitas son problemas, dúbidas ou apreciacións que se repiten aínda que veñan de puntos de vista diferentes dentro da industria. Así e todo, tamén apareceron respostas que non eran comúns ás demais entrevistas e que é interesante analizar por tratar puntos máis concretos.

Para comezar, comentouse que a **sostibilidade** terá unha importancia moito maior nun futuro e que será un tema que vaia avanzando co tempo, tanto na creación e deseño de produtos máis sostibles como na reciclaxe dos mesmos posteriormente. Ademais, tratouse un caso de uso que non saíu nas demais reunións, este trata sobre a axuda da **tecnoloxía nun vehículo autónomo**. Comentouse desde o punto de vista da seguridade, observando que pode ser de utilidade para que ninguén poida acceder ó sistema do vehículo. Por outro lado, a aprendizaxe automática tamén pode ser de gran utilidade na detección e clasificación de obxectos, outorgando maior precisión que a aprendizaxe automática convencional e podendo utilizarse desta forma na conducción autónoma.

Noutra das entrevistas fíxose referencia a que estarían máis dispostos a levar a cabo distintos tipos de proxectos se houberen **axudas dispoñibles** para financiar dalgunha maneira as distintas propostas de computación cuántica.

Tamén se presentou a mellora na análise de datos en proxectos que traballan con **big data**. Na actualidade, analizar grandes cantidades de datos é unha tarefa complicada, pero as empresas están interesadas en tratalos para o seu uso. A computación cuántica ten a capacidade de procesar grandes números de datos e de axilizar este proceso polo que podería ser de utilidade.

Noutra conversación, tratouse o tema dos usos da computación cuántica para a **optimización de procesos químicos** dentro da industria automotriz. Ás veces, é inevitable traballar con materiais que son complicados de tratar debido á súa composición química. Ademais disto, tamén poden influír outros factores que dificultan o proceso de manufacturado, como pode ser a temperatura ou a humidade. Por iso, nesta reunión falouse de optimizar configuracións de máquinas tendo en

conta tanto condicións ambientais como outra serie de parámetros químicos, para poder traballar os materiais de forma adecuada.

Nesta mesma conversa tratábase o uso de **materias primas heteroxéneas**. Na maioría das ocasións os compoñentes de entrada son dunhas dimensións e materiais iguais, mais, noutras ocasións poden aparecer produtos que varíen. Este proceso pode resultar máis custoso debido ás modificacións das variables de entrada e a computación cuántica podería vir axudar no axuste das mesmas.

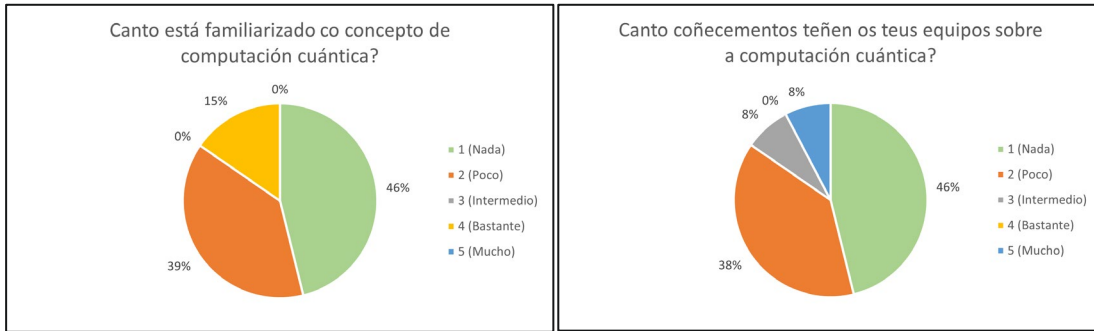
Noutra das entrevistas o interlocutor comentou que un dos problemas que podería ter ó implementar a tecnoloxía foi o **pequeno tempo de implantación** que tería. Nun proceso industrial non pode haber grandes paros que afecten ó ritmo de produción polo que non se poden facer todas as probas que se quererían, podendo dificultar a introdución da tecnoloxía.

Outra das mencións a destacar foi a do **aumento do volume de datos** no caso da aprendizaxe automática, durante a novena entrevista. En ocasións, a cantidade de imaxes introducidas nestes sistemas é limitada, así como a calidade de imaxe utilizada, debido ós tempos e a capacidade dos algoritmos durante o adestramento dos mesmos. O que se comentaba nesta entrevista era que grazas á maior capacidade de cálculo proporcionada pola computación cuántica, podería aumentarse o número de imaxes do adestramento, obtendo a posibilidade de mellorar os resultados.

### *Preguntas numéricas*

Para finalizar a enquisa, fixéronse unha serie de preguntas ás que os entrevistados debían contestar de maneira numérica do 1 ó 5, sendo 1 "nada" e 5 equivalente a "moito". A continuación, poden verse os resultados de maneira gráfica para facer unha mellor análise dos datos.

Nas Figuras 35 e 36 pódese comprobar que tanto os entrevistados coma os seus equipos considéranse bastante descoñecedores da computación cuántica:



Figuras 35 e 36.

A pesar de ser descoñecedores desta tecnoloxía, como se pode observar na Figura 37, ó preguntarlles respecto a se implementarían algún caso de uso, preséntanse bastante predispostos na súa meirande parte a participar na resolución dalgún nos próximos anos.

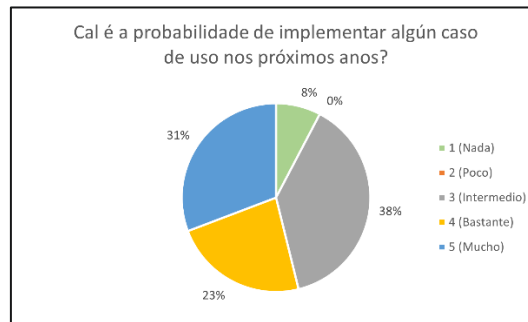


Figura 37.

Ademais, ó preguntarlles ós entrevistados se pensan que a computación cuántica vai ter un impacto significativo no ámbito empresarial, na súa maioría as respostas atopáronse entre o 4 e o 5, como se pode ver na Figura 38.

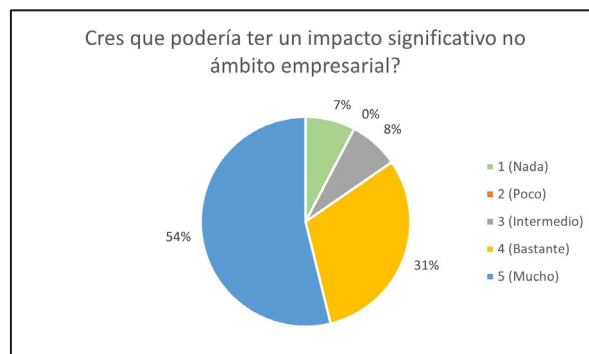
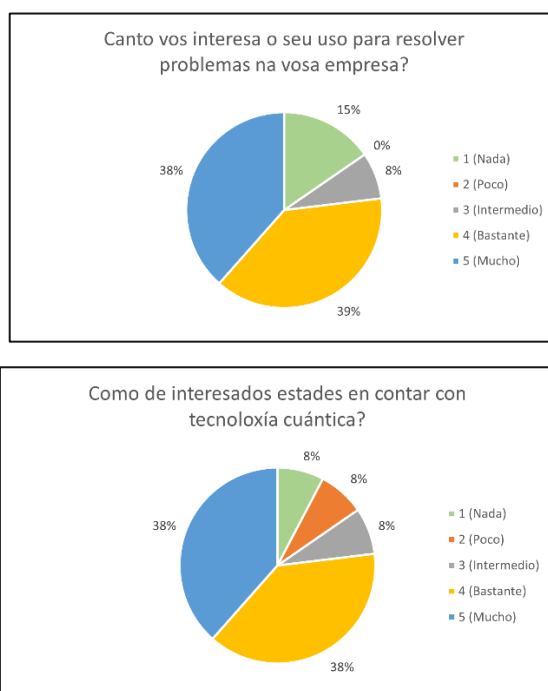


Figura 38.



Por outro lado, a continuación presentáronselles dúas cuestións máis respecto ó uso desta tecnoloxía na propia empresa: “Canto vos interesa o uso da computación cuántica para resolver problemas na vosa empresa?” e “Como de interesados estades en contar con tecnoloxía cuántica?”. Os entrevistados responderon a estas dúas cuestións cunha avaliación entre 4 e 5 maioritariamente, o que resultan respostas moi positivas de cara á implementación da cuántica nalgún caso de uso (Figura 39 e 40).

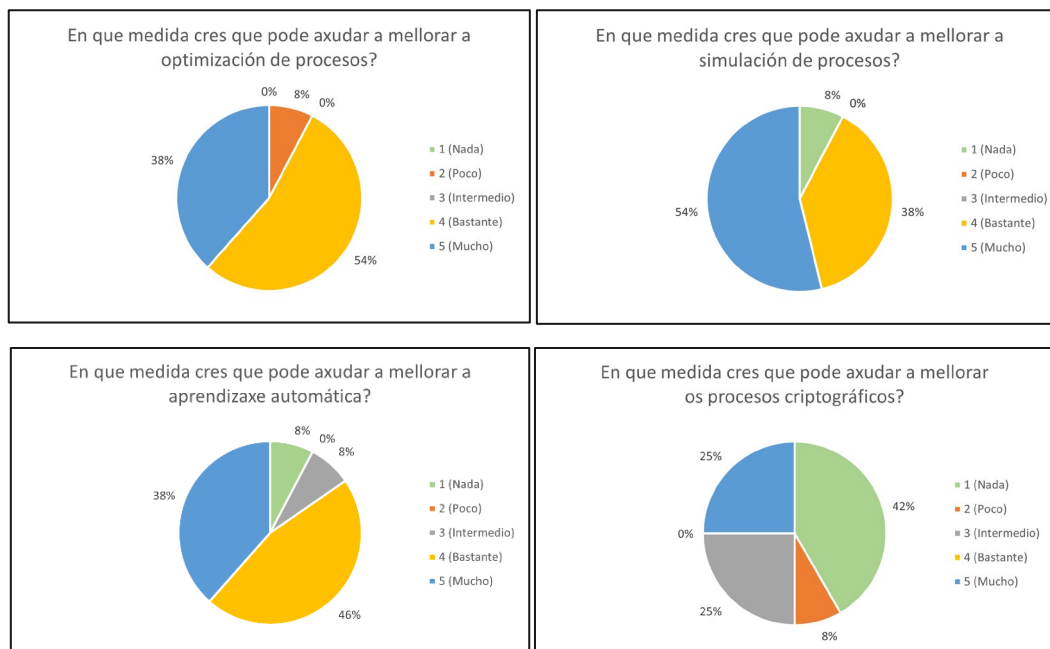


Figuras 39 e 40.

Por último, preguntóuselles ós entrevistados en que medida pensaban que a computación cuántica podería axudarlles a resolver problemas e a mellorar procesos das súas empresas, segundo as diferentes clases de problemas. Isto pode verse nas Figuras 41, 42, 43 e 44.

As respostas das preguntas sobre optimización, simulación e aprendizaxe automática obtiveron respostas moi positivas, cun alto grado de respostas entre o 4 e o 5. Desta forma pode verse que os entrevistados teñen un alto grado de interese, aínda que de forma variada en resolver este tipo de problemas. Así e todo, a criptografía varía respecto ó resto. A miúdo, as respostas tenden a ser negativas, con cualificacións na súa maioría entre 1 e 3. Isto débese a que a criptografía non ten un impacto directo tan evidente, o que pode levar a que as persoas non perciban a súa necesidade coa

mesma urxencia. Con todo, é un compoñente esencial que contribúe a garantir a seguridade e a privacidade no ámbito automobilístico.



Figuras 41, 42, 43 e 44.

Como se pode ver nas diferentes respostas e información obtida dos entrevistados, os resultados aseméllanse en parte á información obtida no estado da arte, coincidindo, de forma xeral, coas necesidades da industria. De igual forma, semella haber interese no sector automotriz e a computación cuántica podería vir resolver diferentes problemas e melloras que a día de hoxe non se poden satisfacer.

## Resumo dos casos de uso atopados

A continuación preséntase unha táboa cos casos de uso na que se describen en que consisten e onde a computación cuántica pode ser de interese.

### *Optimización da planificación*

Actualmente a planificación realízase da man de profesionais baseándose na súa experiencia e pericia en combinación con aplicacións como follas de cálculo. No proceso de planificación teñen que ter en conta **múltiples variables**: produtos, tempos de cambios entre produtos, recursos humanos para fabricalos, medios,

maquinaria, loxística, demanda, clientes, etc., e múltiples restricións entre elas. Ademais, nos últimos anos, o aumento na variabilidade da demanda que se ve modificada de maneira habitual atendendo a **imprevistos na cadea produtiva**, á falta de stock ou a demanda por parte doutras empresas, obriga a **replanificar con moita máis asiduidade**.

Non existen na actualidade, algoritmos de planificación que poidan ter en conta a totalidade de combinacións posibles. **Para reducir a complexidade** destes problemas e buscar solucións nun prazo razoable de tempo, os algoritmos clásicos requiren poñer restricións, **non teñen en conta todas as variables** e a súa relación, etc, o que impide poder atopar unha planificación que se axuste á realidade e necesidades da empresa. Practicamente a totalidade de empresas relataron como invisten moito tempo e recursos na planificación, sen ter a certeza tampouco que o resultado da planificación sexa o óptimo. Coa computación cuántica poderíanse **buscar solucións óptimas en menos tempo** explorando todas as combinacións posibles e axudando ós profesionais na procura de planificacións óptimas.

Dependendo das características do proceso produtivo, distinguimos as seguintes particularizacións de caso de uso en canto ó concepto de planificación:

- **Optimización de planificación en fabricación por lotes.** Na fabricación por lotes, debe terse en conta de xeito específico os tempos de cambio entre referencias ademais do seu stock final necesario para cubrir a demanda, a súa disposición e tamaño, os medios loxísticos para moveas, os medios físicos para fabricar cada una das referencias, os recursos humanos, etc. As máquinas non están dedicadas a unha única referencia, o **tempo de cambio** entre elas, é variable dependendo das mesmas e o seu orde. Cantos menos cambios de referencia menor será o tempo de paro polo seu cambio, mais é necesario cubrir a demanda diaria de múltiples referencias tendo en conta tamén a zona de almacenaxe dispoñible, minimizando o stock, sen perder de vista que, para fabricar diferentes pezas, pódense necesitar un número diferente de recursos humanos máis ou menos especializados.
- **Optimización de planificación de repartos en produción en liña.** Nun proceso en liña o produto avanza por diferentes postos nos que se lles realiza diversas accións nas que son necesarias diferentes referencias, material, recursos humanos, etc. Outra característica, que distingue a produción en lote da produción en liña, é que neste caso un **produto e o seguinte son diferentes**, polo que os procesos e as pezas a engadir non son as mesmas dun

produto ó posterior. Para minimizar o borde de liña, espazo próximo a cada un dos postos onde se almacenan as pezas a engadir, a loxística que da servizo a estes postos toma moita relevancia. Unha das técnicas amplamente utilizada é a realización de *kits* (conxunto de pezas que se lle engaden a un produto) e que un vehículo loxístico autónomo proporcione eses *kits* no posto correcto, no momento correcto para o produto a producir. Por outra banda, dependendo do produto haberá que realizar uns ou outros procesos que toman máis ou menos tempo. Por tanto, a planificación deste reparto e secuenciación de produtos depende de moitas referencias, que nas zonas de *kit* as persoas traballan conxuntamente con vehículos loxísticos (AGVs, AFTs, etc), a frecuencia de paso polo borde de liña, localización das zonas de almacenaxe, tempos de proceso, etc.

- **Optimización de planificación en procesos químicos**, nos que o proceso produtivo depende de moitas variables de entrada para cada unha das diferentes referencias a producir. **A formulación de produción depende de multitude de variables**, produtos químicos, reactivos, a súa concentración, como se engaden ó proceso produtivo, variables ambientais, etc. Optimizando a secuenciación dos produtos en canto a formulación, para facilitar o traballo do persoal revertería directamente nunha maior eficiencia e menor taxa final de defectos.

### *Mellora do control de calidade*

Actualmente o control de calidade visual realízase normalmente a man por profesionais con experiencia en atopar os defectos que poden xurdir nos produtos. Nalgúns casos, este control de calidade está automatizado utilizando **visión artificial e técnicas de aprendizaxe automática**. Non obstante, aínda que as técnicas de aprendizaxe e visión artificial xa se están a utilizar, aínda existen multitude de casos de uso nos que aínda non se poden utilizar. O ambiente de produción, iluminación moi cambiante provocando reflexos, suciedade que se confunde con defectos, a calidade das imaxes e iluminación necesaria, o curto espazo de tempo para a realización de todo o proceso, os materiais utilizados no sector, defectos case imperceptibles, diferenza de cores mínimos, etc., son só algúns dos inconvenientes que a computación cuántica podería resolver.

Ademais, os controis realízanse de dúas formas, revisando cada un dos produtos obtidos ou analizando un de forma aleatoria cada certo número de produtos

producidos. A automatización do proceso permite analizar todos os produtos que se precisen nun menor tempo. Ademais, este tipo de procesos pode detectar defectos complicados e limitar o erro humano que puidese aparecer.

Coa computación cuántica, este proceso, normalmente realizado mediante aprendizaxe automática, pode axilizarse aínda máis e incluso **aumentar a calidade ou o número de imaxes** utilizadas no adestramento, polo que pode supoñer un claro avance e unha mellora neste proceso.

### *Optimización en tempo real*

A computación cuántica permite a realización de problemas complexos e a obtención de resultados nun **menor tempo** grazas á súa **velocidade de cálculo**. Debido a estas características pode ser de axuda en procesos e aplicacións que requiran **resultados en tempo real**.

Isto pode ser útil en gran variedade de situacións. Por exemplo, destaca a mellora e diminución do tempo de reacción ante situacións imprevistas como poden ser paros na produción por diversas razóns. Predicir, a partir de datos de variables de proceso e produto, posibles paros imprevistos en tempo real, **minimizaría estas paradas non planificadas**. Por outro lado tamén é interesante para aplicacións de **xemelgo dixital**, onde se simulan procesos reais e onde a capacidade de cálculo é moi importante.

### *Simulación na preproducción*

A día de hoxe moitos procesos de deseño pasan por unha serie de **probos e creación de prototipos** que se poderían reducir aforrando diversos recursos.

Nesta etapa previa á produción pode ser interesante **poñer a proba diferentes características** dos materiais ou das propias pezas finais para ver como se comportan ante diferentes esforzos ou situacións, aforrando despois cambios sobre pezas xa construídas.

Ademais, aparte das propias pezas, poden simularse diferentes **condicións externas**, como por exemplo condicións atmosféricas, e observar a súa resistencia ante estas coa posibilidade de facer axustes sen ter que simular estas características nun espazo real aforrando diñeiro, materiais e tempo.

## *Optimización das zonas de almacenaxe*

A día de hoxe a **optimización de espazos para almacenaxe** faise en base a suposicións do que pode ser un deseño óptimo.

Optimizar a disposición do almacén pode ter un impacto significativo na **eficiencia das operacións**. A computación cuántica ten a capacidade de analizar distintos deseños de almacén e disposición de andeis co propósito de **maximizar a capacidade de almacenamento** e **minimizar as distancias** que os traballadores e os vehículos loxísticos deben percorrer.

## *Optimización das rutas de transporte*

Os **desprazamentos**, xa sexa **dentro da empresa** co movemento de compoñentes dun lugar a outro, **ou fóra dela** mediante diversos medios de transporte, son unha parte común na maioría das empresas.

Hoxe en día a procura de rutas de transporte faise de maneira convencional e optimizar estes desprazamentos pode xerar aforros significativos de diversos custos, tempo e redución de emisións.

A optimización das rutas de transporte loxístico interno, está intimamente relacionado coa optimización das zonas de almacenaxe.

## *Simulación de fluxos loxísticos*

A simulación de fluxos loxísticos, especialmente na produción en liña, é un problema complexo cunha gran cantidade de variables. Existen na actualidade aplicacións para a simulación de fluxos loxísticos, nos que se modelan os diferentes movementos de material simplificando a realidade e reducindo as variables. **A simulación do fluxo loxístico permitiría verificar cambios** de reparto, de rutas de transporte de *kits*, etc., previo a cambios de reparto ou á definición de rutas.

## *Nesting*

No presente, a optimización da colocación e tamaño do material para o seu procesado realízase por persoal con experiencia que en base a suposicións ordenan e orientan

os moldes para a obtención dos diferentes produtos a obter. Nun vehículo hai multitude de pezas tapizadas. No proceso produtivo desas pezas utilízanse **diferentes materiais** (coiro, tela, etc) de diferentes cores nos que se cortan **diferentes patróns**. Tamén nos procesos de embutición, nos que a materia prima é o metal, débense minimizar os recortes a desbotar.

Mellorar no proceso de *nesting* pode levar a **aforros** substanciais en termos de **materiais** e outros **custos** de produción.

A computación cuántica podería axudar neste campo analizando as **combinacións para colocar a maior cantidade de patróns** sobre a materia prima de forma eficiente.

## 5. Discusión

Ata esta sección revisouse o estado tanto da computación cuántica como da computación cuantoinspirada a día de hoxe, analizáronse as aplicacións realizadas ata a actualidade con computación cuántica e se viu a metodoloxía usada nas entrevistas, así como os resultados das mesmas. Nesta sección interpretarase a información recadada en todo o documento.

Como se poder ver na Figura 1, os problemas de optimización son os máis relevantes para a computación cuántica, sendo os tipos de problemas nos que máis implementada está esta tecnoloxía a día de hoxe, e seguirán tendo un gran peso no futuro segundo diferentes estudos. Isto débese a diversos motivos. Por un lado, estes tipos de problemas están presentes nunha ampla variedade de áreas, desde a loxística e a cadea de subministración, ata a optimización de recursos, a programación, e moitos outros campos. Por outro lado, son problemas combinatorios de tipo NP-Completo, polo que o uso da computación cuántica é ideal para obter unha vantaxe significativa na súa resolución en comparación coa computación clásica.

Actualmente, non existen tantas aplicacións nin investigacións centradas na simulación como hai no caso da optimización, pola contra, e aínda que a optimización sexa o campo no que máis vai axudar a cuántica, semella que dentro das aplicacións futuras, a simulación comezará a ter un papel importante, aínda que algunhas empresas xa están investigando sobre este tema a día de hoxe.

Deseguido, semella que a aprendizaxe automática e a criptografía atópanse nun segundo plano no campo da automoción na actualidade, mais ambas terán máis aplicacións a medida que avance a tecnoloxía.

Por un lado, a aprendizaxe automática semella ter un uso máis directo na área da automoción. Por agora, segundo se viu nas entrevistas, os casos de uso que teñen máis valor son os relacionados coa visión artificial para o control de calidade, pero poderían xurdir melloras ou novas utilidades nos vindeiros anos.

Por outro lado, a criptografía utilízase para asegurar a integridade e a confidencialidade da información e, aínda que tomará maior importancia de cara ó futuro, o desenvolvemento actual da criptografía na cuántica tamén é importante para evitar ataques como os *Store Now Decrypt Later*.

Para solucionar casos de uso reais a nivel industrial destes 4 tipos de problemas utilizáronse tanto modelos híbridos de *quantum annealing* complementados con



computación clásica e como solucións cuantoinspiradas, con hardware clásico construído especificamente para resolver da maneira máis óptima posible problemas con múltiples combinacións. As computadoras cuánticas universais tamén se aplicaron nalgúns casos de uso, aínda que parecen ter pouca relevancia na solución de problemas de grandes dimensións.

Recolléronse os casos de estudos máis interesantes do sector da automoción e coa información obtida pode observarse que D-Wave é unha das empresas máis grandes a nivel internacional en relación á computación cuántica, investindo no sector desde 2012 [71]. Ademais, actualmente, conta co maior número de proxectos, na súa maioría tratando problemas de optimización.

Por outra banda, aínda que se comezan a ver proxectos cuánticos, en ocasións a tecnoloxía non está o suficientemente avanzada, sexa pola capacidade de cómputo actual ou as condicións concretas que se necesita para utilizar estas técnicas. A computación cuantoinspirada trata de resolver problemas das empresas mentres que a tecnoloxía cuántica non está o suficientemente desenvolta. Empresas como Fujitsu apostan por esta tecnoloxía e a comercializan a día de hoxe.

Respecto ás clases de problemas, os entrevistados estiveron bastante interesados en problemas de optimización, simulación e tamén de aprendizaxe automático. A criptografía non é identificada polos entrevistados como unha clase tan importante no seu ámbito por non atoparse dentro das súas necesidades directas. Así e todo, cabe destacar que a ciberseguridade é importante na automoción, e noutros sectores, para manter seguros os datos e as comunicacións, polo que aínda que foi menos mencionado das entrevistas, a ciberseguridade e a criptografía poscuántica son valiosas para o sector.

No que respecta á investigación do sector do automóbil en Galicia, de forma xeral pódese ver nas Figuras 35 e 36 que as empresas descoñecen a computación cuántica e os seus usos. Pese a isto, en xeral os entrevistados cren que é útil usar a cuántica para mellorar os distintos tipos de procesos na súa empresa (Figuras 41, 42, 43 e 44).

En relación ós casos de uso, a **aplicación máis repetida** entre todas as entrevistas foi a **optimización da planificación**, a maioría dos entrevistados realizan esta tarefa a man, baseándose na experiencia de profesionais, con ferramentas como follas de cálculo. Esta é unha actividade que practicamente ten que facerse en todos os ámbitos do sector e na maioría dos casos conleva unha gran cantidade de datos entrelazados, polo que non se adoita conseguir a combinación óptima aínda contando

con persoal experimentado. Ter un planificador óptimo permitiría obter maiores beneficios e reaccionar de forma eficiente a posibles imprevistos.

Ademais, moi poucos dos entrevistados posúen un control de calidade baseado en intelixencia artificial, normalmente este proceso tamén se realiza a man mediante profesionais con experiencia, buscando erros en cada peza que sae da produción ou cunha análise de pequenas mostras. A intelixencia artificial cuántica podería axudar ás empresas a migrar cara un axuste automático das variables de entrada dos procesos que provocan os defectos no produto final. Ademais sería útil adestrar os modelos nun menor tempo, isto axudaría tamén a ter unha taxa de erro menor e **mellorar o control de calidade** dos seus produtos.

Tamén se observou que actualmente nas empresas hai dous tipos de **rotas de transporte**. Por un lado están as rutas externas, as cales se calculan con medios tradicionais, e por outro lado teñen rutas internas, nas que moitas empresas usan trens loxísticos, carretillas, AGVs, AFTs, etc En ambos casos, normalmente propónse unha solución subóptima porque os medios de cálculo tradicionais non teñen en conta factores como por exemplo a conxestión do tráfico, sexa tanto en rutas exteriores coma interiores. A resolución destes problemas mediante unha mellor optimización permitiría ter en conta máis factores e desta maneira axilizar procesos de transporte e loxística.

Un dos temas que se repetira nalgunhas entrevistas foi a simulación de materiais e produto. Esta tarefa dentro da simulación podería axudar en fases de deseño, previas á produción. Desta forma, poden facerse diferentes probas de forma simulada con diversas variables como condicións atmosféricas (humidade, temperatura...) ou diferentes esforzos ós que someter as pezas, comprobando a súa resistencia a estes. Esta aplicación pode evitar realizar procesos de proba e erro ou reducir o número de prototipos aforrando recursos, como sucede en moitas ocasións a día de hoxe. Ademais, debido ós grandes recursos que necesita e a capacidade da cuántica de acelerar os procesos e reducir os tempos fan da **simulación de produtos en preproducción** unha boa aplicación para solucionar mediante computadores cuánticos.

Ademais dos casos de uso, tamén se atoparon respostas comúns respecto ás vantaxes e os inconvenientes. Por un lado, as vantaxes máis repetidas foron o aumento da **velocidade de cálculo**, que permite acelerar as solucións a procesos produtivos das empresas, e, grazas a esta, a oportunidade de tratar **problemas complexos** que anteriormente non se podían solucionar, os cales teñen múltiples

variables que aumentan de forma exponencial conforme aumenta a escala do problema, isto permite tanto mellorar a eficiencia das fábricas coas solucións que xa tiñan anteriormente como desenvolver novas solucións para novos procesos produtivos que non tiñan anteriormente debido á súa complexidade.

Con todo, hai dous grandes inconvenientes por parte das empresas para implementar esta tecnoloxía. O que ten maior importancia é o tema dos **custos**. O acceso á tecnoloxía é limitado e a infraestrutura necesaria para levar a cabo unha solución cuántica nun escenario real pode ser custosa. É importante que o beneficio obtido coa implementación da cuántica sexa grande para que as empresas a utilicen para resolver ou optimizar os casos de uso, polo que a necesidade dun **retorno de inversión** nun tempo considerado é crucial. Polo tanto a opción de contar con colaboracións externas que podan realizar esta parte do proxecto é necesaria.

Ademais diso, hai outra desvantaxe a ter en conta, a necesidade dunha **canle e rede segura para enviar os seus datos** ás infraestruturas externas e a necesidade de **ceder datos a terceiros** ó colaborar con outras entidades. Para as empresas a confidencialidade dos datos é un aspecto importante e ceder os seus datos a terceiros pode ser un problema, polo que precisan saber como se van tratar e o nivel de seguridade co que se protexen.

Outro dos inconvenientes que se poden observar nas empresas a día de hoxe e que tamén se fixo notable durante as entrevistas é a **falta de dixitalización** das empresas. A dixitalización é o primeiro paso que deben dar as empresas para poder facer un bo tratamento dos seus datos e obter o máximo partido deles. Para isto, necesitan rexistrar os seus datos de forma que posteriormente poidan utilizarse. Da mesma forma, se os datos non se atopan dixitalizados non poderá obterse o máximo rendemento da computación clásica, que radica en problemas complexos ou aqueles con moitas variables a ter en conta.

Ademais, mencionaron distintas dificultades como a posible necesidade de creación dunha **infraestrutura interna** para procesamento dos datos, a **falta de coñecemento** sobre o tema xunto coas **dificultades internas das propias empresas para lanzar proxectos** de investigación.

Como xa se comentara anteriormente, a necesidade de contratar persoal formado de forma interna non é especialmente relevante ó contar con entidades externas que posúen o coñecemento necesario en cuántica. Ademais, moitas das empresas están interesadas en resolver casos de uso a curto prazo, e as que non o están, están

interesadas en resolvelos a longo prazo. Ademais, á gran maioría dos entrevistados interesoulles poder levar a cabo un test piloto.

En resumo, ó longo do estudo analizáronse datos do estado da arte actual e das propias entrevistas feitas de primeira man. Estes datos aportan información sobre a dirección da industria e proporcionan unha idea do rumbo a tomar para poder integrar esta nova tecnoloxía na área da automoción.

## 6. Conclusión

O obxectivo desta investigación é comprender o alcance da tecnoloxía cuántica e os seus casos de uso nun entorno industrial, concretamente na industria automotriz. Para isto, realizouse unha investigación do estado da arte onde se expuxeron en que punto se encontra a computación cuántica actualmente, os tipos de tecnoloxía existentes, os casos de uso nos que se está investigando na industria e os que tomarán partido nun futuro.

Respecto á clase de problemas, dividíronse en catro clases: optimización, simulación, aprendizaxe automática e criptografía. Estas foron utilizadas para analizar o estado da arte e facilitar o entendemento do tema nas entrevistas.

Pese a que actualmente existen poucas aplicacións industriais, espérase que o número de *cúbits* das dúas clases de computadoras medre de maneira semellante a como fixo a computación clásica coa lei de Moore, e estímase que nun prazo entre 5 e 10 anos as computadoras cuánticas sexan o suficientemente potentes como para levar a cabo tarefas de optimización e incluso simulación en diferentes áreas industriais, non só no que respecta á industria automotriz.

Ademais das computadoras cuánticas, as tecnoloxías cuantoinspiradas prometen tamén poder resolver aplicacións de tamaño industrial nos próximos anos, mantendo unha capacidade de computación semellante á da computación cuántica actual. Encontráronse exemplos de casos de uso reais tanto para computadoras cuánticas coma para solucións cuantoinspiradas, na súa maior parte de optimización.

Posteriormente, realizáronse varias entrevistas que contaban cunha presentación a modo de explicación da materia e un cuestionario para comprender a posible relación entre a computación cuántica e os problemas que xorden no sector. Nestas entrevistas obtivéronse diversas respostas, tanto para os casos de uso como para a perspectiva das empresas cara á utilización desta tecnoloxía. Aínda que as empresas non coñecían, na meirande parte dos casos, a realidade desta tecnoloxía, encontráronse diferentes aplicacións e a maioría de entrevistados estaban interesados en facer un test de piloto para probas. A algúns dos entrevistados tamén lles atraía o uso desta tecnoloxía no curto ou no longo prazo.

Ademais, vese posible que dentro dalgúns anos se perciba un maior interese por parte de empresas do sector, como consecuencia do aumento do número de *cúbits* e da madurez da tecnoloxía, a cal permitirá aumentar o número de casos de uso nos que se poderá aplicar.

Pese a todo, aínda non se ten claro cales son os casos de uso óptimos para este tipo de tecnoloxía e as empresas deben contar ou colaborar con persoal especializado que lles aconselle sobre cales das súas problemáticas se poden solucionar utilizando este tipo de computación.

De igual forma, existen diversas razóns polas que as empresas poden ver beneficios no uso desta nova computación, con todo, tamén existen reticencias. Por un lado, para as empresas os custos que pode supoñer a implantación do uso desta tecnoloxía é un punto de inflexión e por tanto, tamén son importantes as posibles subvencións ou axudas que poidan haber. Por outro lado, outra das barreiras para as empresas do sector é a cesión de datos a terceiros. Compartir datos fóra da empresa é un inconveniente no ámbito da seguridade e a confidencialidade, polo que para as empresas supón un problema. Estes problemas teranse que resolver de cara ó futuro para desenvolver esta tecnoloxía da man das empresas.

A maiores, é necesario que as empresas coñezan a existencia da cuántica, do seu grado de desenvolvemento e a súa dispoñibilidade, para que sexan capaces de comprender que é unha ferramenta coa que mellorar procesos xa existentes e resolver problemas que poidan xurdir para elas. Unha boa aproximación para eliminar incertezas e animalas a usar esta tecnoloxía pode ser enfocarse en que comprendan a computación cuántica non coma unha dificultade, senón como unha ferramenta coa que solucionar os seus problemas sen necesidade de entender o seu funcionamento.

## 7. Bibliografía

- [1] DiVincenzo, D. P. (2000). The physical implementation of quantum computation. *Fortschritte der Physik: Progress of Physics*, 48(9-11), 771-783.
- [2] Ladd, T. D., Jelezko, F., Laflamme, R., Nakamura, Y., Monroe, C., & O'Brien, J. L. (2010). Quantum computers. *nature*, 464(7285), 45-53.
- [3] Wang, S., Pei, Z., Wang, C., & Wu, J. (2021). Shaping the future of the application of quantum computing in intelligent transportation system. *Intelligent and Converged Networks*, 2(4), 259-276.
- [4] IBM. IBM's website <https://www.ibm.com/es-es/topics/quantum-computing>
- [5] Google. Quantum AI website. <https://quantumai.google/hardware>
- [6] Fujitsu. Fujitsu's website. <https://www.fujitsu.com/global/>
- [7] Intel. Intel's website. <https://www.intel.la/content/www/xl/es/research/quantum-computing.html>
- [8] D-Wave Systems. D-Wave Systems website.  
[https://docs.dwavesys.com/docs/latest/c\\_gs\\_1.html](https://docs.dwavesys.com/docs/latest/c_gs_1.html)
- [9] Bleximo. Bleximo's website. <https://bleximo.com/>
- [10] IonQ. IonQ website. <https://ionq.com/>
- [11] Honeywell. Honeywell's website.  
<https://www.honeywell.com/us/en/company/quantum>
- [12] Grupo de Computación Cuántica. (2003). Introducción al modelo cuántico de computación. Tech. Rep. 19. Junio.
- [13] Abhijith J., Adedoyin, A., Ambrosiano, J., Anisimov, P., Casper, W., ... & Andrey Y. Likhov. (2022). Quantum Algorithm Implementations for Beginners. *ACM Transactions on Quantum Computing* 3, 4, Article 18, 92 pages.
- [14] Fedorov, A., Steffen, L., Baur, M., da Silva, M. P., & Wallraff, A. (2012). Implementation of a Toffoli gate with superconducting circuits. *Nature*, 481(7380), 170-172.
- [15] Martoňák, R., Santoro, G. E., & Tosatti, E. (2004). Quantum annealing of the traveling-salesman problem. *Physical Review E*, 70(5), 057701.

- [16] Wang, Y., Wu, S., & Zou, J. (2016). Quantum annealing with Markov chain Monte Carlo simulations and D-wave quantum computers. *Statistical Science*, 362-398.
- [17] D-Wave Systems. (2023). D-Wave Demonstrates First-Ever Coherent Quantum Spin Glass Dynamics on More than 5,000 Qubits. [D-Wave Demonstrates First-Ever Coherent Quantum Spin Glass Dynamics on More than 5,000 Qubits \(dwavesys.com\)](https://www.dwavesys.com)
- [18] D-Wave Systems. 250+ Early Quantum Applications. <https://www.dwavesys.com/learn/featured-applications/>
- [19] Berdote, A. (2018). Una revisión del modelo de Ising y su aplicación en sociología a través del modelo de Sznajd. Universidad del País Vasco. [Trabajo de Fin Grado](#).
- [20] Fratzl, P., & Penrose, O. (1995). Ising model for phase separation in alloys with anisotropic elastic interaction—I. Theory. *Acta metallurgica et materialia*, 43(8), 2921-2930.
- [21] Stauffer, D., & Schulze, C. (2007). Urban and scientific segregation: The Schelling-Ising model. [arXiv preprint arXiv:0710.5237](#).
- [22] Fujitsu. Digital annealer website. <https://www.fujitsu.com/es/digitalannealer/>
- [23] Aramon, M., Rosenberg, G., Valiante, E., Miyazawa, T., Tamura, H., & Katzgraber, H. G. (2019). Physics-inspired optimization for quadratic unconstrained problems using a digital annealer. *Frontiers in Physics*, 7, 48. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2019.00048/full>
- [24] Nakayama, H., Koyama, J., Yoneoka, N., & Miyazawa, T. (2021). Description: third generation digital annealer technology. *Fujitsu Limited: Tokyo, Japan*. Description: Third Generation Digital Annealer Technology. [https://www.fujitsu.com/global/documents/about/research/techintro/3rd-g-da\\_en.pdf](https://www.fujitsu.com/global/documents/about/research/techintro/3rd-g-da_en.pdf)
- [25] Sao, M., Watanabe, H., Musha, Y., & Utsunomiya, A. (2019). Application of digital annealer for faster combinatorial optimization. *Fujitsu Scientific and Technical Journal*, 55(2), 45-51. <https://www.fujitsu.com/global/documents/about/resources/publications/fstj/archives/vol55-2/paper12.pdf>
- [26] Tatsumura, K., Dixon, A. R., & Goto, H. (2019, September). FPGA-based simulated bifurcation machine. In 2019 29th International Conference on Field Programmable Logic and Applications (FPL) (pp. 59-66). IEEE. <https://doi.org/10.1109/FPL.2019.00019>



- [27] Máximo número de Spins. [https://aws.amazon.com/marketplace/pp/prodview-lr2uqjtqwr62k?sr=0-2&ref\\_=beagle&applicationId=AWSMPContessa](https://aws.amazon.com/marketplace/pp/prodview-lr2uqjtqwr62k?sr=0-2&ref_=beagle&applicationId=AWSMPContessa)
- [28] Lau, J. W. Z., Lim, K. H., Shrotriya, H., & Kwek, L. C. (2022). NISQ computing: where are we and where do we go?. AAPPS Bulletin, 32(1), 27.
- [29] Shor, P. W. (1995). Scheme for reducing decoherence in quantum computer memory. Physical review A, 52(4), R2493.
- [30] Devitt, S. J., Munro, W. J., & Nemoto, K. (2013). Quantum error correction for beginners. Reports on Progress in Physics, 76(7), 076001.
- [31] Lucas, A. (2014). Ising formulations of many NP problems. Frontiers in physics, 2, 5.
- [32] Johnson, D. S. (1990, July). Local optimization and the traveling salesman problem. In International colloquium on automata, languages, and programming (pp. 446-461). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [33] Kleywegt, A. J., & Papastavrou, J. D. (1998). The dynamic and stochastic knapsack problem. Operations research, 46(1), 17-35.
- [34] Demange, M., Ekim, T., Ries, B., & Tanasescu, C. (2015). On some applications of the selective graph coloring problem. European Journal of Operational Research, 240(2), 307-314.
- [35] Biondi, M., Heid, A., Henke, N., Mohr, N., Pautasso, L., Ostojic, I., Wester, L., & Zimmel, R. (2021). Quantum computing use cases are getting real. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/quantum-computing-use-cases-are-getting-real-what-you-need-to-know>
- [36] Burkacky, O., Pautasso, L., & Mohr, N. (2020). Will quantum computing drive the automotive future. McKinsey & Company, 1, 33-38. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/will-quantum-computing-drive-the-automotive-future>
- [37] Red Española de Supercomputación. RES website. <https://www.res.es/>
- [38] BSC – Barcelona Supercomputing Center. (2022). Un paso más hacia la computación cuántica europea: la EuroHPC JU firma acuerdos para albergar los seis ordenadores cuánticos. Noticias del BSC. <https://www.bsc.es/es/noticias>
- [39] Barcelona Supercomputing Center. (2023). Visitamos el primer ordenador cuántico de España: aquí empieza la carrera nacional para alcanzar los 30 qubits en

2025. <https://www.bsc.es/es/visitamos-el-primer-ordenador-cu%C3%A1ntico-de-espa%C3%B1a-aqu%C3%AD-empieza-la-carrera-nacional-para-alcanzar-los>

[40] CESGA. (2023). CESGA y Fujitsu crean un centro en Galicia para desarrollar e impulsar la tecnología cuántica. <https://www.cesga.es/>

[41] CESGA. (2023). Galicia adquiere por 13,9 M€ el ordenador cuántico más potente de España y uno de los primeros de Europa. <https://www.cesga.es/>

[42] CESGA. (2023). Qmio, el nuevo computador cuántico del CESGA. <https://www.cesga.es/qmio-el-nuevo-computador-cuantico-del-cesga-2/>

[43] IBM. (2023). IBM y Fundación Ikerbasque se asocian para lanzar un innovador Centro de Computación Cuántica en el País Vasco. <https://es.newsroom.ibm.com/announcements>

[44] CESGA. (2022). Presentación iniciativa de computación cuántica. <https://www.cesga.es/>

[45] Gobierno de España. Quantum Spain website. <https://quantumspain-project.es/>

[46] CESGA. (2021). CESGA despliega una infraestructura basada en tecnología cuántica nativa. <https://www.cesga.es/>

[47] Peng, T., Harrow, A. W., Ozols, M., & Wu, X. (2020). Simulating large quantum circuits on a small quantum computer. Physical review letters, 125(15), 150504.

[48] Bayerstadler, A., Becquin, G., Binder, J., Botter, T., Ehm, H., Ehmer, T., ... & Winter, F. (2021). Industry quantum computing applications. EPJ Quantum Technology, 8(1), 25.

[49] Ménard, A., Ostojic, I., Patel, M., & Volz, D. (2020). A game plan for quantum computing. McKinsey Quarterly.

[50] D-Wave. What is quantum annealing? <https://www.dwavesys.com/>

[51] Farhi, E., Goldstone, J., Gutmann, S., & Sipser, M. (2000). Quantum computation by adiabatic evolution. [arXiv preprint quant-ph/0001106](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0001106).

[52] Gilliam, A., Woerner, S., & Gonciulea, C. (2021). Grover adaptive search for constrained polynomial binary optimization. Quantum, 5, 428.

[53] Zhang, J., Wang, W., Zhao, Y., & Cattani, C. (2012). Multiobjective quantum evolutionary algorithm for the vehicle routing problem with customer satisfaction. Mathematical Problems in Engineering, 2012.

- [54] Fedorov, D. A., Peng, B., Govind, N., & Alexeev, Y. (2022). VQE method: a short survey and recent developments. *Materials Theory*, 6(1), 1-21.
- [55] Farhi, E., Goldstone, J., & Gutmann, S. (2014). A quantum approximate optimization algorithm. [arXiv preprint arXiv:1411.4028](https://arxiv.org/abs/1411.4028)
- [56] Bechtold, M., Barzen, J., Leymann, F., Mandl, A., Obst, J., Truger, F., & Weder, B. (2023). Investigating the effect of circuit cutting in QAOA for the MaxCut problem on NISQ devices. [arXiv preprint arXiv:2302.01792](https://arxiv.org/abs/2302.01792)
- [57] Durr, C., & Hoyer, P. (1996). A quantum algorithm for finding the minimum. [arXiv preprint quant-ph/9607014](https://arxiv.org/abs/quant-ph/9607014).
- [58] Lloyd, S. (1996). Universal quantum simulators. *Science*, 273(5278), 1073-1078.
- [59] Hirai, H., Horiba, T., Shirai, S., Kanno, K., Omiya, K., Nakagawa, Y. O., & Koh, S. (2022). Molecular structure optimization based on electrons–nuclei quantum dynamics computation. *ACS omega*, 7(23), 19784-19793.
- [60] Kim, I. H., Liu, Y. H., Pallister, S., Pol, W., Roberts, S., & Lee, E. (2022). Fault-tolerant resource estimate for quantum chemical simulations: Case study on Li-ion battery electrolyte molecules. *Physical Review Research*, 4(2), 023019.
- [61] Harrow, A. W., Hassidim, A., & Lloyd, S. (2009). Quantum algorithm for linear systems of equations. *Physical review letters*, 103(15), 150502.
- [62] IBM. IBM Quantum. Docs. Learn quantum computing: a field guide. Quantum Phase Estimation. <https://docs.quantum-computing.ibm.com/>
- [63] Duan, B., Yuan, J., Yu, C. H., Huang, J., & Hsieh, C. Y. (2020). A survey on HHL algorithm: From theory to application in quantum machine learning. *Physics Letters A*, 384(24), 126595.
- [64] Havlíček, V., Córcoles, A. D., Temme, K., Harrow, A. W., Kandala, A., Chow, J. M., & Gambetta, J. M. (2019). Supervised learning with quantum-enhanced feature spaces. *Nature*, 567(7747), 209-212.
- [65] Li, W., Lu, Z. D., & Deng, D. L. (2022). Quantum neural network classifiers: A tutorial. *SciPost Physics Lecture Notes*, 061.
- [66] Majumder, R., Khan, S. M., Ahmed, F., Khan, Z., Ngeni, F., Comert, G., ... & Chowdhury, M. (2021). Hybrid classical-quantum deep learning models for autonomous vehicle traffic image classification under adversarial attack. [arXiv preprint arXiv:2108.01125](https://arxiv.org/abs/2108.01125).

- [67] Rivest, R. L., Shamir, A., & Adleman, L. (1978). A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems. *Communications of the ACM*, 21(2), 120-126.
- [68] Shor, P. W. (1999). Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM review*, 41(2), 303-332.
- [69] Wang, W., & Stöttinger, M. (2020). Post-quantum secure architectures for automotive hardware secure modules. *Cryptology ePrint Archive*.
- [70] Kabanov, I. S., Yunusov, R. R., Kurochkin, Y. V., & Fedorov, A. K. (2018, February). Practical cryptographic strategies in the post-quantum era. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1936, No. 1). AIP Publishing.
- [71] BCG (2018). The next decade in quantum computing and how to play. <https://www.bcg.com/publications/2018/next-decade-quantum-computing-how-play>
- [72] BCG (2019). Where will quantum computers create value and when? <https://www.bcg.com/publications/2019/quantum-computers-create-value-when>
- [73] BCG (2021). What happens when “if” turns to “when” in quantum computing? <https://www.bcg.com/publications/2021/building-quantum-advantage>
- [74] BCG (2023). Quantum computing is becoming business ready. <https://www.bcg.com/publications/2023/enterprise-grade-quantum-computing-almost-ready>
- [75] Yarkoni, S., Leib, M., Skolik, A., Streif, M., Neukart, F., & von Dollen, D. (2019). Volkswagen and quantum computing: An industrial perspective. *Digitale Welt*, 3, 34-37.
- [76] Bova, F., Goldfarb, A. & Melko, R.G. (2021). Commercial applications of quantum computing. *EPJ Quantum Technol.* 8, 2. <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-021-00091-1>
- [77] Yarkoni, S., Alekseyenko, A., Streif, M., Von Dollen, D., Neukart, F., & Bäck, T. (2021, October). Multi-car paint shop optimization with quantum annealing. In *2021 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)* (pp. 35-41). IEEE.
- [78] Neukart, F., Compostella, G., Seidel, C., Von Dollen, D., Yarkoni, S., & Parney, B. (2017). Traffic flow optimization using a quantum annealer. *Frontiers in ICT*, 4, 29.

- [79] Yarkoni, S., Neukart, F., Tagle, E. M. G., Magiera, N., Mehta, B., Hire, K., ... & Hofmann, M. (2020, November). Quantum shuttle: traffic navigation with quantum computing. In Proceedings of the 1st ACM SIGSOFT International Workshop on Architectures and Paradigms for Engineering Quantum Software (pp. 22-30).
- [80] Kuruvilla, G. (2018). Volkswagen Boosts Battery Research Using Quantum Computing. <https://www.dwavesys.com/company/newsroom/media-coverage/the-drive-volkswagen-boosts-battery-research-using-quantum-computing/>
- [81] Amazon. (2021). Winners announced in the BMW group quantum computing challenge. Amazon Web Services. <https://aws.amazon.com/es/blogs/quantum-computing/winners-announced-in-the-bmw-group-quantum-computing-challenge/>
- [82] Luckow, A., Klepsch, J., & Pichlmeier, J. (2021). Quantum computing: Towards industry reference problems. *Digitale Welt*, 5, 38-45.
- [83] Mehta, A., Muradi, M., & Woldetsadick, S. (2019). Quantum annealing based optimization of robotic movement in manufacturing. In *Quantum Technology and Optimization Problems: First International Workshop, QTOP 2019, Munich, Germany, March 18, 2019, Proceedings 1* (pp. 136-144). Springer International Publishing.
- [84] Inoue, D., Okada, A., Matsumori, T., Aihara, K., & Yoshida, H. (2021). Traffic signal optimization on a square lattice with quantum annealing. *Scientific reports*, 11(1), 3303.
- [85] D-Wave Systems. (2021). Toyota Central R&D Case Story: Traffic Signal Optimization. D-Wave Systems website.
- [86] Ford. (2018). Why Ford Is Taking a Quantum Leap into the Future of Computing. Medium. <https://medium.com/@ford/why-ford-is-taking-a-quantum-leap-into-the-future-of-computing-453128a2ea9f>
- [87] Ohzeki, M., Miki, A., Miyama, M. J., & Terabe, M. (2019). Control of automated guided vehicles without collision by quantum annealer and digital devices. *Frontiers in Computer Science*, 1, 9.
- [88] D-Wave Systems. (2022). Groovenauts and Shimizu Corporation: Moving Mountains with Quantum Computing. D-Wave Systems website. <https://www.dwavesys.com/learn/resource-library/>
- [89] Groovenauts. (2022). Groovenauts and Shimizu Optimize Construction Related Soil Transport Using the Power of Quantum Computers. <https://www.magellanic-clouds.com/blocks/en/2022/01/17/shimz/>

- [90] D-Wave Systems. (2022). Groovenauts and Mitsubishi Estate: Creating sustainable cities through waste collection optimization. D-Wave Systems website. <https://www.dwavesys.com/learn/resource-library/>
- [91] Groovenauts. (2020). Using Artificial Intelligence (AI) and Quantum Computers for Optimized Waste Collection and Transport Verified in Reduction of CO2 Emissions. <https://www.magellanic-clouds.com/blocks/en/2020/03/30/mec/>
- [92] IonQ (2023). Picturing the future with quantum-enabled road sign recognition. <https://ionq.com/resources/picturing-the-future-quantum-enabled-road-sign-recognition>
- [93] Schinkel, F., Schwende, I., Schade, R., Cerny, E., & Fellendorf, M. (2021). Traffic management through traffic signal control by Quantum-Inspired optimization. In 27th ITS World Congress, Hamburg, Germany.
- [94] Sao, M., Watanabe, H., Musha, Y., & Utsunomiya, A. (2019). Application of digital annealer for faster combinatorial optimization. Fujitsu Scientific and Technical Journal, 55(2), 45-51.
- [95] Streif, M., Yarkoni, S., Skolik, A., Neukart, F., & Leib, M. (2021). Beating classical heuristics for the binary paint shop problem with the quantum approximate optimization algorithm. Physical Review A, 104(1), 012403.
- [96] Volkswagen (2019). Volkswagen optimizes traffic flow with quantum computers. <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/volkswagen-optimizes-traffic-flow-with-quantum-computers-5507>
- [97] Glos, A., Kundu, A., & Salehi, Ö. (2023). Optimizing the production of test vehicles using hybrid constrained quantum annealing. SN Computer Science, 4(5), 609.
- [98] Hussain, H., Javaid, M. B., Khan, F. S., Dalal, A., & Khalique, A. (2020). Optimal control of traffic signals using quantum annealing. Quantum Information Processing, 19, 1-18.
- [99] Dalyac, C., Henriët, L., Jeandel, E., Lechner, W., Perdrix, S., Porcheron, M., & Veshchezerova, M. (2021). Qualifying quantum approaches for hard industrial optimization problems. A case study in the field of smart-charging of electric vehicles. EPJ Quantum Technology, 8(1), 12.
- [100] Streif, M., Neukart, F., & Leib, M. (2019). Solving quantum chemistry problems with a d-wave quantum annealer. In Quantum Technology and Optimization

Problems: First International Workshop, QTOP 2019, Munich, Germany, March 18, 2019, Proceedings 1 (pp. 111-122). Springer International Publishing.

[101] Guijo, D., Onofre, V., Del Bimbo, G., Mugel, S., Estepa, D., De Carlos, X., ... & Orus, R. (2022). Quantum artificial vision for defect detection in manufacturing. [arXiv preprint arXiv:2208.04988](#)

[102] Villalba-Diez, J., Ordieres-Meré, J., González-Marcos, A., & Larzabal, A. S. (2022). Quantum Deep Learning for Steel Industry Computer Vision Quality Control. *IFAC-PapersOnLine*, 55(2), 337-342.

[103] Lord, A., Woodward, R., Murai, S., Sato, H., Dynes, J., Wright, P., ... & Shields, A. (2023, March). London quantum-secured metro network. In *Optical Fiber Communication Conference* (pp. W4K-4). Optica Publishing Group.

## Anexo A

Neste anexo preséntanse varios casos de uso estudados, en experimentación ou realizados por empresas. Cada unha das táboas expón unha clase de problema das vistas na Sección 3.1.

CASOS DE USO EN OPTIMIZACIÓN				
APLICACIÓN	ALGORITMO	COMPAÑÍA	REFERENCIA	ANO
Optimización da estación de pintura binaria	QAOA	Volkswagen, grupos de investigación	[95]	2020
Optimización da estación de pintura	Quantum Annealing	Volkswagen, D-Wave	[77]	2021
Optimización do movemento dun robot na aplicación de PVC e selado de articulacións	Quantum Annealing	BMW, D-Wave, Fujitsu	[83]	2022
Creación de rutas para distribución de diésel	Quantum Annealing	Ford, NASA	[86]	2018
Control de vehículos de guiado autónomo (AGVs)	Quantum Annealing	Denso, grupo de investigación, D-Wave, Fujitsu	[87]	2019



Fluxo de tráfico das rutas de transporte de residuos	Quantum Annealing	Groovenauts, Shimizu, D-Wave	[88] [91]	2022
Fluxo de tráfico das rutas de transporte de residuos	Quantum Annealing	Groovenauts, Mitsubishi, D-Wave	[89] [90]	2021
Probas para optimización do tráfico entre o centro e o aeroporto de Pekín	Quantum Annealing	Volkswagen, D-Wave	[78]	2017
Optimización do tráfico en Lisboa durante a conferencia WebSummit	Quantum Annealing	Volkswagen, D-Wave	[79][96]	2019
Organización de rutas considerando a satisfacción do cliente	MOQEA	Grupo de investigación	[53]	2012
Localización de sensores nun vehículo	-	BMW, Accenture	[81]	2021
Optimización dos tests realizados a un vehículo na súa	Duerr-Hoyer, Quantum Amplitude Amplification	BMW, One QuBit eNTiTy	[81]	2021

etapa de preproducción				
Optimización dos tests realizados a un vehículo	Quantum Annealing	Grupo de investigación, D-Wave	[97]	2023
Optimización da sinalización do tráfico	Quantum Annealing	Grupo de investigación, D-Wave	[84]	2021
Control sobre a sinalización do tráfico	Quantum Annealing	Grupo de investigación, D-Wave	[98]	2020
Control da sinalización do tráfico	Quantum Annealing	Toyota, D-Wave	[85]	2021
Optimización da carga intelixente de vehículos eléctricos	QAOA	Grupo de investigación	[99]	2021
Optimización da estrutura molecular	-	Toyota, QunaSys	[59]	2022
Optimización de rutas no porto de Hamburgo	Digital Annealer	Fujitsu	[93]	2021
Optimización de estantes nun almacén	Digital Annealer	Fujitsu	[94]	2019

Planificación de asignación de traballadores	Digital Annealer	Fujitsu	[94]	2019
--	------------------	---------	------	------

Táboa 2.

CASOS DE USO EN SIMULACIÓN				
APLICACIÓN	ALGORITMO	COMPAÑÍA	REFERENCIA	ANO
Simulacións para desenvolvemento de baterías	-	Mercedes	[60]	2022
Química cuántica	Quantum Annealing	Volkswagen, D-Wave	[100]	2019
Simulación da deformación de materiais	-	BMW, Qu&Co	[81]	2021

Táboa 3.

CASOS DE USO EN APRENDIZAXE AUTOMÁTICA				
APLICACIÓN	ALGORITMO	COMPAÑÍA	REFERENCIA	ANO
Recoñecemento de imaxe en automóbiles	-	IonQ, Hyundai	[92]	2023

Detección de defectos durante a fabricación	Quantum Support Vector Machine, QBoost	Multiverse Computing, Ikerlan, IBM, D-Wave	[101]	2022
Avaliación da calidade de superficies	QCNN	Grupo de investigación	[102]	2022
Evitar ataques a vehículos autónomos.	QNN	Grupo de investigación	[66]	2021
Control da calidade mediante aprendizaxe automática	-	BMW, QC Ware	[81]	2021

Táboa 4.

CASOS DE USO EN CRIPTOGRAFÍA				
APLICACIÓN	ALGORITMO	COMPAÑÍA	REFERENCIA	ANO
Implementación dunha rede baseada en criptografía cuántica sobre fibra	QKD	BT, Toshiba	[103]	2023

Táboa 5.

## Anexo B

Na seguinte táboa móstranse os diferentes casos de uso recollidos por QUTAC para os que poder ser relevante para as empresas utilizar computación cuántica nun futuro.

CASOS DE USO FUTUROS SEGUNDO QUTAC				
PROBLEMA	ALGORITMO	COMPAÑÍA	CASO DE USO	ÁREA
Modelado de ecuacións diferenciais parciais	QML	Airbus	Aprendizaxe automática	Aeroespacial
Optimización do deseño da carga das ás dun avión	HHL, TBD	Airbus	Optimización	Aeroespacial
Predición dunha reacción química en química molecular cuántica	VQE	Basf	Simulación	Química
Ruta de camións e maquinaria	Quantum Annealing, QAOA	Basf	Optimización	Industria
Simulación de dinámica de moléculas	VQE, QPE	Boehringer Ingelheim	Simulación	Farmacia

Optimización de imaxe a nivel molecular	QAOA	Boehringer Ingelheim	Optimización	Farmacia
Diseño de vehículos usando métodos de elementos finitos	HHL, QAOA	Bosch	Simulación	Automoción
Test de software e probas de corrección	QSAT, QAOA	Bosch	Optimización	Desenvolvemento de software
Test para vehículos e as súas características	Quantum Annealing, QAOA	BMW	Optimización	Automoción
Mapeo dun robot para selado de PVC	Quantum Annealing, QAOA	BMW	Optimización	Automoción
Plan de produción segundo a necesidade	Quantum Annealing, Simulated Annealing	Infineon	Optimización	Loxística
Optimización da cadea de subministración mediante sensores e actuantes	Quantum Annealing, QAOA	Infineon	Optimización	Loxística

Cálculo de propiedades e reactividade en materiais	VQE	Merck	Simulación	Química, farmacia
Identificación e control de parámetros para control de enfermidades	Quantum Annealing, QAOA	Merck	Simulación	Química, farmacia, ...
Criptografía cuántica para IoT	QKD	Munich Re	Criptografía	IoT, seguridade
Seguros para cargamento con data límite	Quantum Annealing, QAOA	Munich Re	Optimización	Transporte
Seguros para baterías de vehículos eléctricos	VQE	Munich Re	Simulación	Automoción
Carga de camiós	Quantum Annealing, QAOA	SAP	Optimización	Loxística
Plan para cadea de subministración	Quantum Annealing, QAOA	SAP	Optimización	Loxística
Optimización de fábrica en tempo real	Quantum Annealing, QAOA	Siemens	Optimización	Industria

Aprendizaxe por reforzo cuántico	VQE, QAOA	Siemens	Aprendizaxe automática	Industria
Optimización de rutas para rede de transporte	RQAOA, LHZ QAOA	Volkswagen	Optimización	Loxística
Cálculo en química para a mellora de baterías	QPE	Volkswagen	Simulación	Química, farmacia, automoción

Táboa 6.



## Anexo C

Neste anexo recóllense diferentes problemas que BMW atopa interesantes para atacar desde a computación cuántica.

CASOS DE OPTIMIZACIÓN ESTUDADOS POR BMW		
APLICACIÓN	VARIANTES	DESCRIPCIÓN
Optimización de rutas de robots	Taller de carrocería, taller de pintura, ensamblaxe, loxística.	Centos de robots por planta, en particular en talleres de carrocería e pintura.
Configuracións do vehículo	Optimizacións de opcións de vehículos, deseño de compoñentes relevantes para choques, deseño de celas para optimización térmica, cálculo da demanda de pezas, optimización da posición dos asentos.	Os vehículos modernos contén moitos subsistemas independentes pero interconectados para os que se debe derivar unha combinación óptima por razóns que inclúen probas de emisións e resistencia.
Verificación de sistemas	Verificación de sistemas automatizados, probas de software.	Probas de subsistemas interconectados que están deseñados e descritos a través de diversos modelos para garantir a seguridade dos sistemas ciberfísicos.
Optimización de rutas	Loxística, frotas, uso compartido de automóbiles, encarrilamento.	Na conducción automatizada e na mobilidade a pedido,

		atopar rutas óptimas é moi importante.
Problemas de distribución e colocación	Colocación de estacións de carga, distribución de vehículos a pedido.	Problemas complexos e non lineais que buscan optimizar a distribución xeográfica de activos.
Planificación estratéxica	Planificación de volume, estratexia de planta, asignación de planta/modelo.	Planificación corporativa altamente complexa a longo prazo.
Planificación táctica	Deseño de estacións de traballo en ensamblaxe, planificación da forza laboral, minimización da repetición de traballos.	Diversos tipos de fallas de produción, por exemplo, erros técnicos e humanos, levan á repetición de traballos e, polo tanto, a custos máis altos.
Planificación operacional	Asignación da forza laboral, equilibrio de liñas, programación de quendas, secuenciación de vehículos.	Produtos altamente personalizables conducen a liñas de produción complexas con tempos de ciclo variables.
Optimización de <i>portfolio</i>	Selección de características na cualificación crediticia, oportunidades de arbitraje, traxectorias de negociación, análise de riscos, fixación de prezos de derivados financeiros.	Selección da distribución de activos óptima considerando diversos obxectivos, por exemplo, rendemento esperado, volatilidade.

Táboa 7.

<b>CASOS DE USO DE QUÍMICA ESTUDADOS POR BMW</b>		
<b>APLICACIÓN</b>	<b>VARIANTES</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Dinámica molecular	Simulación de baterías, simulación de hidrógeno, inhibidores de corrosión, ciencia de materiais para o deseño de carrocerías de automóbiles.	Comprender a dinámica molecular e a estrutura electrónica, simular reaccións na superficie de materiais de baterías.

Táboa 8.

<b>CASOS DE USO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA ESTUDADOS POR BMW</b>		
<b>APLICACIÓN</b>	<b>VARIANTES</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Enxeñería e deseño	Simulación aerodinámica e acústica, disposición de compoñentes para sistemas de arrefriamento, optimización do ruído aerotransportado, dinámica de fluídos computacional.	Resolver conxuntos de ecuacións diferenciais é un elemento clave no proceso de desenvolvemento de calquera vehículo.

Táboa 9.

**CASOS DE USO DE  
CRIPTOGRAFÍA  
ESTUDADOS POR BMW**

<b>APLICACIÓN</b>	<b>VARIANTES</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Inspección visual	Inspección visual na manufactura, detección de obxectos na conducción automatizada.	Mellorar a clasificación de datos a través da representación no espazo de Hilbert.

*Táboa 10.*

## Anexo D

A revista McKinsey tamén recolle en varios artigos diferentes posibles aplicacións da computación cuántica e o seu posible desenvolvemento ó longo do tempo [35] [36].

CASOS DE USO DE FUTUROS DA REVISTA MCKINSEY		
ERA	ETAPA	APLICACIÓN
Era na que a computación cuántica presenta erros non corrixidos	Etapa temperá	Optimización na fabricación (rutas de robots, planificación de traballos, etc).
		Optimización do tráfico e rutas de robots de almacenamento.
		Optimización da rede de subministro.
	Etapa avanzada	Procura de novos materiais para baterías. Deseño lixeiro de materiais.
Era na que a computación cuántica presenta erros, pero corrixidos	Etapa temperá	Condución autónoma. Análise de elementos finitos, deseño xenerativo.
	Etapa avanzada	Optimización do tráfico e rutas de frotas de vehículos.
Computación cuántica universal	-	Planificación da produción.
		Calidade e mantemento predictivo.

Táboa 11.

CASOS DE USO FUTUROS DA REVISTA MCKINSEY		
ERA	TIPOS DE PROBLEMAS	APLICACIÓNS
A curto prazo	Optimización	Optimización combinatoria da loxística multicanle.
		Optimización do fluxo de tráfico local.
		Encarrilado de vehículos.
		Adestramento eficiente no tempo de algoritmos de conducción autónoma.
A medio prazo	Simulacións	Transferencia de calor e masa.
		Dinámica de fluídos.
		Simulación das propiedades dos materiais a nivel atómico.
	Optimizacións avanzadas	Minimizar as faltas na cadea de subministro.
		Optimizar o tráfico nas cidades.
		Optimizar as rutas de frota multimodais a gran escala.
		Optimizar rutas de subministro que involucran varios modos de transporte.
	Machine learning	Mellorar o recoñecemento de patróns.
		Avanzar en algoritmos de clasificación.

A longo prazo	Criptografía	Seguridade dixital e mitigación de resgos.
		Sistemas de navegación aloxados na nube para frotas de mobilidade compartida.

Táboa 12.

## Anexo E

Neste anexo, preséntanse as aplicacións polas que aposta BCG nun futuro en computación cuántica.

CASOS DE USO FUTUROS SEGUNDO BCG		
PROBLEMA	ÁREA	CASO DE USO
Selección, síntese e probas de materiais	Deseño de materiais	Optimización
Simulación dos materiais	Deseño de materiais	Simulación
Simulación de moléculas	Investigación en medicamentos	Simulación
Simulación e análise de resgo bancario	Servizos financeiros	Optimización, simulación
Predición de eventos de resgo puntuais importantes	Servizos financeiros	Simulación
Prevenición de branqueo de capital e prevención de fraude	Servizos financeiros	Aprendizaxe automática
Simulación de líquidos e gases en condicións cambiantes	Dinámica de fluídos	Simulación

Diminución de probas de proba e error	Dinámica de fluídos	Simulación
Resolución de ecuacións diferenciais parcialmente non lineais	Dinámica de fluídos	Simulación
Mellora e precisión na creación e manipulación de mallas	Dinámica de fluídos	Simulación
Optimización de rutas	Transporte e loxística	Optimización
Planificación da rede	Transporte e loxística	Optimización
Manexo de frota de transportes	Transporte e loxística	Optimización
Optimización da cadea de subministración	Transporte e loxística	Optimización
Predicións a máis longo prazo	Meteoroloxía	Optimización, simulación
Anticipación na detección de catástrofes	Meteoroloxía	Optimización, simulación
Maior velocidade e precisión para industrias que dependen do tempo	Meteoroloxía	Optimización, simulación
Localización de novos lugares para perforación de petróleo	Enerxía	Optimización
Conversión de enerxía solar	Enerxía	Simulación
Optimización de rutas	Aeroespacial	Optimización



Deseño de algoritmos para vehículos autónomos	Automoción	Aprendizaxe automática
---	------------	------------------------

Táboa 13.

## Anexo F

Neste anexo preséntanse as respostas das entrevistas realizadas.

ENTREVISTA 1	
Preguntas de resposta aberta	
Existe algún proceso na túa empresa no que se invista moito tempo ou sexa pouco eficiente? Cal? Cres que poderías utilizar a computación cuántica neste caso?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Detección en tempo real de problemas durante a produción.</li> <li>• Control de calidade na produción.</li> <li>• Almacenamento de baterías debido ó seu perigo.</li> </ul>
Identificaches algún caso de uso ó que aplicar a computación cuántica? Cal/Cales?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O reformulamento da sostibilidade na industria.</li> <li>• Redeseño de produtos para producir impacto cero, por exemplo, no despece, reposición ou reciclaxe.</li> <li>• Seguridade en coches autónomos.</li> <li>• Toma de decisións dun vehículo en tempo real.</li> </ul>

<p>En que área ves máis probable que axude a computación cuántica á túa empresa? (Optimización, simulación, aprendizaxe automática, criptografía ou outra)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En optimización de procesos (maior e mellor cruce de datos e optimización das cargas de traballo).</li> <li>• Simulación de deseño de produto.</li> </ul>
<p>Que consideras que é o máis atractivo da computación cuántica para a túa empresa? (Exemplo: velocidade de cálculo, capacidade de abordar problemas complexos, vantaxe competitiva, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A vantaxe competitiva.</li> <li>• A necesidade de protección (ciberseguridade).</li> <li>• O posicionamento de Galicia, España e Europa no que a computación cuántica se refire dentro do mundo e a non dependencia doutras potencias.</li> </ul>
<p>Detectas algún inconveniente á hora de implantar a computación cuántica na túa empresa? Cal?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os custos (o prezo, o mantemento, manter baixas as temperaturas que requiren os computadores).</li> </ul>
<p>Que aspectos cres que poderían ser barreiras para a adopción da computación cuántica na túa empresa? (Exemplo: custos, falta de coñecemento, incerteza, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os custos.</li> <li>• A necesidade de que a opinión popular non estea en contra da computación cuántica e o seu uso.</li> </ul>
<p>Consideraches a inversión en formación e capacitación para que os teus empregados estean preparados para utilizar a computación cuántica nun futuro próximo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si, a curto prazo existirá a formación neste ámbito. Tamén pola necesidade de xente e pola necesidade de coñecemento para transformar datos en información e análise.</li> </ul>
<p>Consideraches anteriormente algunha colaboración con institucións de investigación ou empresas especializadas en computación cuántica para facilitar a adopción desta tecnoloxía na túa</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non porque lle parecía inaccesible.</li> <li>• Descoñecemento das instalacións do CESGA.</li> <li>• Coñecemento da tecnoloxía mais en outras cidades.</li> </ul>

empresa? En caso negativo, reconsideraríalo?	
Considerarías implementar a computación cuántica a curto prazo? E a longo prazo?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si. A curto prazo, se fose posible, gustaríalle implementala.</li> </ul>
Considerarías realizar un test piloto utilizando este tipo de tecnoloxía?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si.</li> </ul>

#### Preguntas numéricas 1

Canto estás familiarizado co concepto de computación cuántica?	2
Canto coñecemento teñen os teus equipos sobre a computación cuántica e a súa potencial aplicación na industria?	5
Cal é o nivel de probabilidade de que implementes algún caso de uso de computación cuántica nos próximos anos?	5
Cres que a computación cuántica podería ter un impacto significativo no ámbito empresarial?	5
Canto che interesa o uso da computación cuántica para resolver problemas na túa empresa?	4
Como de interesado estás en contar con tecnoloxía cuántica?	5

#### Preguntas numéricas 2

En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a optimización de procesos na túa empresa?	4
---	---

En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a simulación de procesos na túa empresa?	5
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a aprendizaxe automática na túa empresa?	4
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar os procesos criptográficos na túa empresa?	5

Táboa 14.

## ENTREVISTA 2

### Preguntas de resposta aberta

<p>Existe algún proceso na túa empresa no que se invista moito tempo ou sexa pouco eficiente? Cal? Cres que poderías utilizar a computación cuántica neste caso?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si, existen moitos procesos que son moi pouco eficientes, tendo en conta que sempre hai imprevistos, avarías ou algún outro suceso que dificulta a planificación da produción.</li> <li>• Si, creo que se podería utilizar a cuántica para solucionar algúns destes problemas.</li> </ul>
<p>Identificaches algún caso de uso ó que aplicar a computación cuántica? Cal/Cales?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si. Optimización da planificación da produción, tendo en conta a cantidade de referencias, máquinas, medios, cestóns e paróns produtivos non previstos.</li> <li>• Optimización de rutas para condutores de carros de materiais.</li> <li>• Optimización de <i>nesting</i>, aproveitamento da materia prima.</li> <li>• Optimización das zonas de almacenaxe.</li> <li>• Simulación de deformación de materiais metálicos, estudo de características dos materiais.</li> <li>• Simulación de ensaios destrutivos (roturas de pezas, tipos de materiais, dimensións dos materiais, velocidade de procesado...).</li> </ul>
<p>En que área ves máis probable que axude a computación cuántica á túa empresa?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poderíase utilizar en todas as áreas.</li> </ul>

<p>(Optimización, simulación, aprendizaxe automática, criptografía ou outra)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A de optimización é a mais probable no seu caso.</li> </ul>
<p>Que consideras que é o máis atractivo da computación cuántica para a túa empresa? (Exemplo: velocidade de cálculo, capacidade de abordar problemas complexos, vantaxe competitiva, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de resolución de problemas.</li> <li>• Abordaxe de problemas complexos.</li> <li>• Resolución de novas problemáticas.</li> </ul>
<p>Detectas algún inconveniente á hora de implantar a computación cuántica na túa empresa? Cal?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O pouco coñecemento sobre o tema.</li> </ul>
<p>Que aspectos cres que poderían ser barreiras para a adopción da computación cuántica na túa empresa? (Exemplo: custos, falta de coñecemento, incerteza, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os custos.</li> <li>• Recursos internos. Necesidade de abrir un proceso interno que podería ser custoso, para por en marcha unha nova tecnoloxía.</li> <li>• Escaseza de formación.</li> </ul>
<p>Consideraches a inversión en formación e capacitación para que os teus empregados estean preparados para utilizar a computación cuántica nun futuro próximo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non. Se chegase a facer algo relacionado con esta tecnoloxía reconsideraríao, pero a día de hoxe é complicado.</li> </ul>
<p>Consideraches anteriormente algunha colaboración con institucións de investigación ou empresas especializadas en computación cuántica para facilitar a adopción desta tecnoloxía na túa empresa? En caso negativo, reconsideraríalo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non o considerara no pasado.</li> <li>• Reconsideraríao. Mais con dúbidas (prezo de instalación, amortización dentro dun período de tempo, axudas dispoñibles, estudos propios previos).</li> </ul>
<p>Considerarías implementar a computación cuántica a curto prazo? E a longo prazo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se existe algún caso de uso que mellore con este tipo de computación, si que o consideraría, tanto a curto como a longo prazo.</li> </ul>

Considerarías realizar un test piloto utilizando este tipo de tecnoloxía?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si, de ser posible interesaríalle.</li> </ul>
<b>Preguntas numéricas 1</b>	
Canto estás familiarizado co concepto de computación cuántica?	1
Canto coñecemento teñen os teus equipos sobre a computación cuántica e a súa potencial aplicación na industria?	1
Cal é o nivel de probabilidade de que implementes algún caso de uso de computación cuántica nos próximos anos?	3
Cres que a computación cuántica podería ter un impacto significativo no ámbito empresarial?	4
Canto che interesa o uso da computación cuántica para resolver problemas na túa empresa?	5
Como de interesado estás en contar con tecnoloxía cuántica?	4
<b>Preguntas numéricas 2</b>	
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a optimización de procesos na túa empresa?	5
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a simulación de procesos na túa empresa?	4

En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a aprendizaxe automática na túa empresa?	4
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar os procesos criptográficos na túa empresa?	5

Táboa 15.



### ENTREVISTA 3

#### Preguntas de resposta aberta

<p>Existe algún proceso na túa empresa no que se invista moito tempo ou sexa pouco eficiente? Cal? Cres que poderías utilizar a computación cuántica neste caso?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transporte dentro de planta (por exemplo cos AGVs).</li> <li>• Transportes externos á planta.</li> <li>• Optimización do almacén.</li> <li>• Preparación de <i>kits</i>.</li> <li>• Si, creo que se podería utilizar a computación cuántica.</li> </ul>
<p>Identificaches algún caso de uso ó que aplicar a computación cuántica? Cal/Cales?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimización de <i>kits</i>.</li> <li>• Optimización da planificación de pedidos.</li> <li>• Optimización da montaxe.</li> <li>• Optimización de transporte de AGVs.</li> <li>• Optimización do almacén.</li> </ul>
<p>En que área ves máis probable que axude a computación cuántica á túa empresa? (Optimización, simulación, aprendizaxe automática, criptografía ou outra)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Scheduling</i> dentro de optimización.</li> <li>• Rutas dentro de optimización.</li> <li>• Simulación.</li> </ul>
<p>Que consideras que é o máis atractivo da computación cuántica para a túa empresa? (Exemplo: velocidade de cálculo, capacidade de abordar problemas complexos, vantaxe competitiva, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de cálculo.</li> <li>• Tratamento de problemas complexos.</li> </ul>
<p>Detectas algún inconveniente á hora de implantar a computación cuántica na túa empresa? Cal?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ter acceso á tecnoloxía de maneira usual (unha vez á semana ou unha vez ó mes).</li> </ul>

<p>Que aspectos cres que poderían ser barreiras para a adopción da computación cuántica na túa empresa? (Exemplo: custos, falta de coñecemento, incerteza, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acceso á tecnoloxía.</li> <li>• (Non interpreta os custos ou a incerteza como unha barreira mais di que pode ser por descoñecemento).</li> </ul>
<p>Consideraches a inversión en formación e capacitación para que os teus empregados estean preparados para utilizar a computación cuántica nun futuro próximo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non a considerara.</li> </ul>
<p>Consideraches anteriormente algunha colaboración con institucións de investigación ou empresas especializadas en computación cuántica para facilitar a adopción desta tecnoloxía na túa empresa? En caso negativo, reconsideraríalo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non, agora reconsideraríao.</li> </ul>
<p>Considerarías implementar a computación cuántica a curto prazo? E a longo prazo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A curto prazo non, mais si a medio prazo.</li> </ul>
<p>Considerarías realizar un test piloto utilizando este tipo de tecnoloxía?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si.</li> </ul>
<p>Preguntas numéricas 1</p>	
<p>Canto estás familiarizado co concepto de computación cuántica?</p>	<p>4</p>
<p>Canto coñecemento teñen os teus equipos sobre a computación cuántica e a súa potencial aplicación na industria?</p>	<p>2</p>
<p>Cal é o nivel de probabilidade de que implementes algún caso de uso de computación cuántica nos próximos anos?</p>	<p>5</p>

Cres que a computación cuántica podería ter un impacto significativo no ámbito empresarial?	5
Canto che interesa o uso da computación cuántica para resolver problemas na túa empresa?	5
Como de interesado estás en contar con tecnoloxía cuántica?	5
<b>Preguntas numéricas 2</b>	
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a optimización de procesos na túa empresa?	4
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a simulación de procesos na túa empresa?	5
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a aprendizaxe automática na túa empresa?	3
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar os procesos criptográficos na túa empresa?	5

Táboa 16.

## ENTREVISTA 4

### Preguntas de resposta aberta

<p>Existe algún proceso na túa empresa no que se invista moito tempo ou sexa pouco eficiente? Cal? Cres que poderías utilizar a computación cuántica neste caso?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buscar correlacións entre grandes cantidades de datos.</li> <li>• Atopar e optimizar regras e restricións.</li> <li>• Problema de optimización de fluxo.</li> <li>• Mellorar a análise en casos de <i>big data</i>.</li> <li>• Dixitalización de procesos en tempo real.</li> </ul>
<p>Identificaches algún caso de uso ó que aplicar a computación cuántica? Cal/Cales?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimización de planta de fabricación con xemelgo dixital.</li> <li>• Optimización de procesos, concretamente regras e restricións.</li> <li>• Mellora e optimización de procesos de calidade.</li> <li>• Ciberseguridade en dixitalización de datos.</li> <li>• Coñecemento do estado de funcionamento e tratamento de avarías das instalacións en tempo real.</li> <li>• Posibilidade de observar a monitorización de diferentes máquinas, coñecer o seu estado e posibilidade de corrixir algún problema.</li> </ul>
<p>En que área ves máis probable que axude a computación cuántica á túa empresa?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimización.</li> <li>• Aprendizaxe automática.</li> </ul>

<p>(Optimización, simulación, aprendizaxe automática, criptografía ou outra)</p>	
<p>Que consideras que é o máis atractivo da computación cuántica para a túa empresa? (Exemplo: velocidade de cálculo, capacidade de abordar problemas complexos, vantaxe competitiva, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de cálculo.</li> </ul>
<p>Detectas algún inconveniente á hora de implantar a computación cuántica na túa empresa? Cal?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La dixitalización da fábrica.</li> <li>• A falta de formación.</li> <li>• Conexións seguras para dixitalización da fábrica.</li> <li>• Uso de estrutura interna para aprobación de proxectos.</li> </ul>
<p>Que aspectos cres que poderían ser barreiras para a adopción da computación cuántica na túa empresa? (Exemplo: custos, falta de coñecemento, incerteza, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dixitalización de compoñentes para monitorización.</li> <li>• Necesidade de xente formada. Cambio de mentalidade e recursos para a xente experimentada e necesidade de xente nova con coñecementos neste novo paradigma.</li> </ul>
<p>Consideraches a inversión en formación e capacitación para que os teus empregados estean preparados para utilizar a computación cuántica nun futuro próximo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non o considerara.</li> </ul>
<p>Consideraches anteriormente algunha colaboración con institucións de investigación ou empresas especializadas en computación cuántica para facilitar a adopción desta tecnoloxía na túa empresa? En caso negativo, reconsideraríalo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non o considerara.</li> </ul>

Considerarías implementar a computación cuántica a curto prazo? E a longo prazo?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• NS/NC</li> </ul>
Considerarías realizar un test piloto utilizando este tipo de tecnoloxía?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si.</li> </ul>
<b>Preguntas numéricas 1</b>	
Canto estás familiarizado co concepto de computación cuántica?	2
Canto coñecemento teñen os teus equipos sobre a computación cuántica e a súa potencial aplicación na industria?	2
Cal é o nivel de probabilidade de que implementes algún caso de uso de computación cuántica nos próximos anos?	4
Cres que a computación cuántica podería ter un impacto significativo no ámbito empresarial?	5
Canto che interesa o uso da computación cuántica para resolver problemas na túa empresa?	5
Como de interesado estás en contar con tecnoloxía cuántica?	5
<b>Preguntas numéricas 2</b>	
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a optimización de procesos na túa empresa?	5
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a simulación de procesos na túa empresa?	5

En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a aprendizaxe automática na túa empresa?	5
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar os procesos criptográficos na túa empresa?	1

Táboa 17.

ENTREVISTA 5	
Preguntas de resposta aberta	
Existe algún proceso na túa empresa no que se invista moito tempo ou sexa pouco eficiente? Cal? Cres que poderías utilizar a computación cuántica neste caso?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizar mesturas químicas de materiais.</li> <li>• Uso de materiais heteroxéneos.</li> </ul>
Identificaches algún caso de uso ó que aplicar a computación cuántica? Cal/Cales?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acortar os tempos de desenvolvemento de simulacións.</li> <li>• Simular sistemas químicos complexos.</li> <li>• Control de calidade e axuste de parámetros segundo produtos de diferentes provedores</li> <li>• Automatización de procesos que usan materias primas heteroxéneas.</li> <li>• Uso de xemelgo dixital.</li> <li>• Simulación en tempo real de probas con materiais.</li> <li>• Axuste de maquinaria segundo condicións ambientais.</li> </ul>

<p>En que área ves máis probable que axude a computación cuántica á túa empresa? (Optimización, simulación, aprendizaxe automática, criptografía ou outra)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimización, sobre todo planificación.</li> <li>• Simulación.</li> </ul>
<p>Que consideras que é o máis atractivo da computación cuántica para a túa empresa? (Exemplo: velocidade de cálculo, capacidade de abordar problemas complexos, vantaxe competitiva, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de cálculo.</li> <li>• Capacidade de abordar problemas complexos.</li> <li>• Posibilidade de revisar produto final e cambiar parámetros en función do resultado para aforrar produtos con fallos.</li> </ul>
<p>Detectas algún inconveniente á hora de implantar a computación cuántica na túa empresa? Cal?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tecnoloxía de difícil acceso, ter unha comunicación constante.</li> <li>• Poderían xurdir dúbidas, por exemplo, como facer a conexión ou se se necesita ter xente preparada neste tema.</li> <li>• Mentalidade con resistencia ó cambio.</li> </ul>
<p>Que aspectos cres que poderían ser barreiras para a adopción da computación cuántica na túa empresa? (Exemplo: custos, falta de coñecemento, incerteza, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• (Respondida na anterior pregunta).</li> </ul>
<p>Consideraches a inversión en formación e capacitación para que os teus empregados estean preparados para utilizar a computación cuántica nun futuro próximo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non aplica.</li> </ul>
<p>Consideraches anteriormente algunha colaboración con institucións de</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non aplica.</li> </ul>



investigación ou empresas especializadas en computación cuántica para facilitar a adopción desta tecnoloxía na túa empresa? En caso negativo, reconsideraríalo?	
Considerarías implementar a computación cuántica a curto prazo? E a longo prazo?	• Non aplica.
Considerarías realizar un test piloto utilizando este tipo de tecnoloxía?	• Non aplica.
<b>Preguntas numéricas 1</b>	
Canto estás familiarizado co concepto de computación cuántica?	2
Canto coñecemento teñen os teus equipos sobre a computación cuántica e a súa potencial aplicación na industria?	1
Cal é o nivel de probabilidade de que implementes algún caso de uso de computación cuántica nos próximos anos?	3
Cres que a computación cuántica podería ter un impacto significativo no ámbito empresarial?	5
Canto che interesa o uso da computación cuántica para resolver problemas na túa empresa?	4
Como de interesado estás en contar con tecnoloxía cuántica?	4
<b>Preguntas numéricas 2</b>	

En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a optimización de procesos na túa empresa?	4
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a simulación de procesos na túa empresa?	4
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a aprendizaxe automática na túa empresa?	4
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar os procesos criptográficos na túa empresa?	1

Táboa 18.

## ENTREVISTA 6

### Preguntas de resposta aberta

<p>Existe algún proceso na túa empresa no que se invista moito tempo ou sexa pouco eficiente? Cal? Cres que poderías utilizar a computación cuántica neste caso?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si que existen procesos que requiren moito tempo.</li> <li>• Novas aplicacións que non se poden facer a día de hoxe coa computación clásica.</li> </ul>
<p>Identificaches algún caso de uso ó que aplicar a computación cuántica? Cal/Cales?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A optimización, tanto en planificación, como en rutas ou <i>nesting</i> pode ser interesante.</li> <li>• En simulación para cálculo de eventos discretos.</li> <li>• Simulación de test de materiais.</li> <li>• Reducir tempo en aplicacións con aprendizaxe automática e novos algoritmos.</li> </ul>
<p>En que área ves máis probable que axude a computación cuántica á túa empresa? (Optimización, simulación, aprendizaxe automática, criptografía ou outra)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Probablemente todas as clases, mais quizais a que ten maior potencial sexa aprendizaxe automática.</li> </ul>
<p>Que consideras que é o máis atractivo da computación cuántica para a túa empresa? (Exemplo: velocidade de cálculo, capacidade de abordar problemas complexos, vantaxe competitiva, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redución de custos.</li> </ul>
<p>Detectas algún inconveniente á hora de implantar a computación cuántica na túa empresa? Cal?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O lugar onde se farían os cálculos.</li> <li>• Necesidade de seguridade, fiabilidade e saber como se van tratar os datos.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dependendo de se se necesita persoal experto, interno ou externo e o seu custo.</li> </ul>
Que aspectos cres que poderían ser barreiras para a adopción da computación cuántica na túa empresa? (Exemplo: custos, falta de coñecemento, incerteza, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custos de adaptación ou creación de algoritmos.</li> </ul>
Consideraches a inversión en formación e capacitación para que os teus empregados estean preparados para utilizar a computación cuántica nun futuro próximo?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dependería do custo no caso de que se tivera que contratar xente interna.</li> </ul>
Consideraches anteriormente algunha colaboración con institucións de investigación ou empresas especializadas en computación cuántica para facilitar a adopción desta tecnoloxía na túa empresa? En caso negativo, reconsideraríalo?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si o considerara.</li> </ul>
Considerarías implementar a computación cuántica a curto prazo? E a longo prazo?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si a curto e a longo prazo.</li> </ul>
Considerarías realizar un test piloto utilizando este tipo de tecnoloxía?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si.</li> </ul>
<b>Preguntas numéricas 1</b>	
Canto estás familiarizado co concepto de computación cuántica?	4
Canto coñecemento teñen os teus equipos sobre a computación cuántica e a súa potencial aplicación na industria?	3
Cal é o nivel de probabilidade de que implementes algún caso de uso de computación cuántica nos próximos anos?	5

Cres que a computación cuántica podería ter un impacto significativo no ámbito empresarial?	5
Canto che interesa o uso da computación cuántica para resolver problemas na túa empresa?	5
Como de interesado estás en contar con tecnoloxía cuántica?	5
<b>Preguntas numéricas 2</b>	
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a optimización de procesos na túa empresa?	5
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a simulación de procesos na túa empresa?	5
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a aprendizaxe automática na túa empresa?	5
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar os procesos criptográficos na túa empresa?	2

Táboa 19.



## ENTREVISTA 7

### Preguntas de resposta aberta

<p>Existe algún proceso na túa empresa no que se invista moito tempo ou sexa pouco eficiente? Cal? Cres que poderías utilizar a computación cuántica neste caso?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Podería ser útil na optimización de procesos.</li> </ul>
<p>Identificaches algún caso de uso ó que aplicar a computación cuántica? Cal/Cales?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimización da configuración das máquinas para aforrar enerxía.</li> </ul>
<p>En que área ves máis probable que axude a computación cuántica á túa empresa? (Optimización, simulación, aprendizaxe automática, criptografía ou outra)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Todas.</li> </ul>
<p>Que consideras que é o máis atractivo da computación cuántica para a túa empresa? (Exemplo: velocidade de cálculo, capacidade de abordar problemas complexos, vantaxe competitiva, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aforro de enerxía.</li> </ul>
<p>Detectas algún inconveniente á hora de implantar a computación cuántica na túa empresa? Cal?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O retorno de inversión ten que ser rápido.</li> </ul>
<p>Que aspectos cres que poderían ser barreiras para a adopción da computación cuántica na túa empresa? (Exemplo: custos, falta de coñecemento, incerteza, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necesidade de ter monitorizada a fábrica para casos de uso en tempo real.</li> <li>• Necesidade de formación para exceder barreiras culturais.</li> <li>• Necesidade dun retorno de inversión rápido.</li> <li>• Necesidade do tratamento de datos de forma segura.</li> </ul>

Consideraches a inversión en formación e capacitación para que os teus empregados estean preparados para utilizar a computación cuántica nun futuro próximo?	• Non aplica.
Consideraches anteriormente algunha colaboración con institucións de investigación ou empresas especializadas en computación cuántica para facilitar a adopción desta tecnoloxía na túa empresa? En caso negativo, reconsideraríalo?	• Non aplica.
Considerarías implementar a computación cuántica a curto prazo? E a longo prazo?	• Non aplica.
Considerarías realizar un test piloto utilizando este tipo de tecnoloxía?	• Non aplica.
<b>Preguntas numéricas 1</b>	
Canto estás familiarizado co concepto de computación cuántica?	1
Canto coñecemento teñen os teus equipos sobre a computación cuántica e a súa potencial aplicación na industria?	2
Cal é o nivel de probabilidade de que implementes algún caso de uso de computación cuántica nos próximos anos?	4
Cres que a computación cuántica podería ter un impacto significativo no ámbito empresarial?	4
Canto che interesa o uso da computación cuántica para resolver problemas na túa empresa?	4



Como de interesado estás en contar con tecnoloxía cuántica?	4
<b>Preguntas numéricas 2</b>	
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a optimización de procesos na túa empresa?	4
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a simulación de procesos na túa empresa?	4
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a aprendizaxe automática na túa empresa?	4
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar os procesos criptográficos na túa empresa?	1

*Táboa 20.*

## ENTREVISTA 8

### Preguntas de resposta aberta

<p>Existe algún proceso na túa empresa no que se invista moito tempo ou sexa pouco eficiente? Cal? Cres que poderías utilizar a computación cuántica neste caso?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planificación de reparto de traballadores. Non está automatizado e leva moito tempo.</li> <li>• Control de calidade de diferentes medidas xeométricas, aspecto, etc.</li> <li>• Creación de novos procesos de deseño.</li> </ul>
<p>Identificaches algún caso de uso ó que aplicar a computación cuántica? Cal/Cales?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A optimización e aceleración do proceso de planificación de reparto de traballadores.</li> <li>• A mellora de control de calidade.</li> <li>• A optimización e mellora do deseño.</li> </ul>
<p>En que área ves máis probable que axude a computación cuántica á túa empresa? (Optimización, simulación, aprendizaxe automática, criptografía ou outra)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimización e simulación.</li> </ul> <p>Quizá tamén aprendizaxe automática mais de forma menos importante.</p>
<p>Que consideras que é o máis atractivo da computación cuántica para a túa empresa? (Exemplo: velocidade de cálculo, capacidade de abordar problemas complexos, vantaxe competitiva, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de cálculo.</li> <li>• Capacidade de abordar problemas complexos.</li> </ul>
<p>Detectas algún inconveniente á hora de implantar a computación cuántica na túa empresa? Cal?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si.</li> <li>• O descoñecemento sobre o tema.</li> <li>• A falta de competencias e capacidades respecto ó área da cuántica.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>Os custos que poidan supor e as dificultades de implantación.</li> </ul>
<p>Que aspectos cres que poderían ser barreiras para a adopción da computación cuántica na túa empresa? (Exemplo: custos, falta de coñecemento, incerteza, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>O feito de ser un tema novo.</li> <li>Tamén ó ser unha novidade, nun proceso industrial necesítase un resultado dentro dun tempo determinado e non se poden facer todas as probas que se quixerían. Pequeno tempo para implantación.</li> </ul>
<p>Consideraches a inversión en formación e capacitación para que os teus empregados estean preparados para utilizar a computación cuántica nun futuro próximo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Non.</li> </ul>
<p>Consideraches anteriormente algunha colaboración con institucións de investigación ou empresas especializadas en computación cuántica para facilitar a adopción desta tecnoloxía na túa empresa? En caso negativo, reconsideraríalo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Non, mais si o reconsideraría.</li> </ul>
<p>Considerarías implementar a computación cuántica a curto prazo? E a longo prazo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Non a curto prazo, mais si a longo prazo.</li> </ul>
<p>Considerarías realizar un test piloto utilizando este tipo de tecnoloxía?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Si.</li> </ul>
<b>Preguntas numéricas 1</b>	
<p>Canto estás familiarizado co concepto de computación cuántica?</p>	1
<p>Canto coñecemento teñen os teus equipos sobre a computación cuántica e a súa potencial aplicación na industria?</p>	1

Cal é o nivel de probabilidade de que implementes algún caso de uso de computación cuántica nos próximos anos?	4
Cres que a computación cuántica podería ter un impacto significativo no ámbito empresarial?	4
Canto che interesa o uso da computación cuántica para resolver problemas na túa empresa?	4
Como de interesado estás en contar con tecnoloxía cuántica?	4
<b>Preguntas numéricas 2</b>	
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a optimización de procesos na túa empresa?	5
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a simulación de procesos na túa empresa?	5
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a aprendizaxe automática na túa empresa?	4
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar os procesos criptográficos na túa empresa?	NS/NC

Táboa 21.



## ENTREVISTA 9

### Preguntas de resposta aberta

<p>Existe algún proceso na túa empresa no que se invista moito tempo ou sexa pouco eficiente? Cal? Cres que poderías utilizar a computación cuántica neste caso?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulación de reparto de traballo. Leva moito tempo realizar a planificación.</li> <li>• Control de calidade mediante imaxe.</li> </ul>
<p>Identificaches algún caso de uso ó que aplicar a computación cuántica? Cal/Cales?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimización e aceleración da planificación de reparto do traballo.</li> <li>• Mellora e aceleración do proceso de control de calidade.</li> </ul>
<p>En que área ves máis probable que axude a computación cuántica á túa empresa? (Optimización, simulación, aprendizaxe automática, criptografía ou outra)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sobre todo en simulación e aprendizaxe automática.</li> <li>• Tamén en optimización.</li> </ul>
<p>Que consideras que é o máis atractivo da computación cuántica para a túa empresa? (Exemplo: velocidade de cálculo, capacidade de abordar problemas complexos, vantaxe competitiva, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redución de tempo.</li> <li>• Velocidade de cálculo.</li> <li>• Aumento do volume de entrada de datos.</li> </ul>
<p>Detectas algún inconveniente á hora de implantar a computación cuántica na túa empresa? Cal?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A comunicación e ciberseguridade dos datos.</li> <li>• Como se xestionaría o envío e recibo de datos.</li> <li>• Necesidade de montaxe dunha infraestrutura de forma interna para explotar os datos que me devolverían tras os cálculos.</li> </ul>

<p>Que aspectos cres que poderían ser barreiras para a adopción da computación cuántica na túa empresa? (Exemplo: custos, falta de coñecemento, incerteza, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A infraestrutura que se necesita de forma interna.</li> </ul>
<p>Consideraches a inversión en formación e capacitación para que os teus empregados estean preparados para utilizar a computación cuántica nun futuro próximo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non o considerara.</li> <li>• Reconsideraríao se a formación se orientase a coñecer como explotar esta tecnoloxía e os datos que se calcularían externamente.</li> </ul>
<p>Consideraches anteriormente algunha colaboración con institucións de investigación ou empresas especializadas en computación cuántica para facilitar a adopción desta tecnoloxía na túa empresa? En caso negativo, reconsideraríalo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non, mais si que o reconsideraría.</li> </ul>
<p>Considerarías implementar a computación cuántica a curto prazo? E a longo prazo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si, tanto a curto como a longo prazo.</li> </ul>
<p>Considerarías realizar un test piloto utilizando este tipo de tecnoloxía?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si.</li> </ul>
<p>Preguntas numéricas 1</p>	
<p>Canto estás familiarizado co concepto de computación cuántica?</p>	<p>1</p>
<p>Canto coñecemento teñen os teus equipos sobre a computación cuántica e a súa potencial aplicación na industria?</p>	<p>2</p>
<p>Cal é o nivel de probabilidade de que implementes algún caso de uso de computación cuántica nos próximos anos?</p>	<p>3</p>

Cres que a computación cuántica podería ter un impacto significativo no ámbito empresarial?	5
Canto che interesa o uso da computación cuántica para resolver problemas na túa empresa?	4
Como de interesado estás en contar con tecnoloxía cuántica?	4
<b>Preguntas numéricas 2</b>	
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a optimización de procesos na túa empresa?	4
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a simulación de procesos na túa empresa?	5
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a aprendizaxe automática na túa empresa?	5
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar os procesos criptográficos na túa empresa?	3

Táboa 22.



## ENTREVISTA 10

### Preguntas de resposta aberta

<p>Existe algún proceso na túa empresa no que se invista moito tempo ou sexa pouco eficiente? Cal? Cres que poderías utilizar a computación cuántica neste caso?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estamos bastante optimizados mais sempre se pode mellorar.</li> <li>• A optimización de postos de mantemento e a xestión de produción sempre é mellorable. Creo que a computación cuántica podería axudarnos a optimizar algúns procesos.</li> </ul>
<p>Identificaches algún caso de uso ó que aplicar a computación cuántica? Cal/Cales?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mellora do equilibrado dos postos de traballo en función da demanda e da dispoñibilidade de pezas, para que os traballadores sufran menos variabilidade e ter en conta imprevistos, cambios ou picos de traballo.</li> <li>• Mantemento predictivo das instalacións.</li> <li>• Análise de materiais para observar deformacións, rotura...</li> </ul>
<p>En que área ves máis probable que axude a computación cuántica á túa empresa? (Optimización, simulación, aprendizaxe automática, criptografía ou outra)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pode axudar en todas.</li> <li>• Primeiro en aprendizaxe automática.</li> <li>• Segundo en simulación.</li> <li>• Terceiro en optimización.</li> <li>• E por último criptografía, quizais a nivel de ciberseguridade dos ordenadores.</li> </ul>
<p>Que consideras que é o máis atractivo da computación cuántica para a túa</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de cálculo.</li> </ul>

<p>empresa? (Exemplo: velocidade de cálculo, capacidade de abordar problemas complexos, vantaxe competitiva, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resolución de problemas complexos que hoxe en día non alcanzamos a resolver.</li> </ul>
<p>Detectas algún inconveniente á hora de implantar a computación cuántica na túa empresa? Cal?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si, que se necesita unha formación.</li> </ul>
<p>Que aspectos cres que poderían ser barreiras para a adopción da computación cuántica na túa empresa? (Exemplo: custos, falta de coñecemento, incerteza, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custos. Saber se é rendible respecto á solución clásica.</li> <li>• Falta de coñecemento.</li> </ul>
<p>Consideraches a inversión en formación e capacitación para que os teus empregados estean preparados para utilizar a computación cuántica nun futuro próximo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non me corresponde.</li> </ul>
<p>Consideraches anteriormente algunha colaboración con institucións de investigación ou empresas especializadas en computación cuántica para facilitar a adopción desta tecnoloxía na túa empresa? En caso negativo, reconsideraríalo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non porque non tiña coñecemento.</li> <li>• Reconsideraríao dependendo do custo económico e dos resultados.</li> </ul>
<p>Considerarías implementar a computación cuántica a curto prazo? E a longo prazo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A curto prazo faría probas de casos máis concretos para ver si é rendible.</li> <li>• A longo prazo dependería dos resultados obtidos no curto prazo.</li> </ul>
<p>Considerarías realizar un test piloto utilizando este tipo de tecnoloxía?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si, sobre todo con aprendizaxe automática.</li> </ul>

Preguntas numéricas 1	
Canto estás familiarizado co concepto de computación cuántica?	2
Canto coñecemento teñen os teus equipos sobre a computación cuántica e a súa potencial aplicación na industria?	1
Cal é o nivel de probabilidade de que implementes algún caso de uso de computación cuántica nos próximos anos?	3
Cres que a computación cuántica podería ter un impacto significativo no ámbito empresarial?	3
Canto che interesa o uso da computación cuántica para resolver problemas na túa empresa?	3
Como de interesado estás en contar con tecnoloxía cuántica?	3
Preguntas numéricas 2	
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a optimización de procesos na túa empresa?	4
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a simulación de procesos na túa empresa?	4
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a aprendizaxe automática na túa empresa?	5

En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar os procesos criptográficos na túa empresa?	3
---	---

Táboa 23.

## ENTREVISTA 11

### Preguntas de resposta aberta

<p>Existe algún proceso na túa empresa no que se invista moito tempo ou sexa pouco eficiente? Cal? Cres que poderías utilizar a computación cuántica neste caso?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planificación da orde dos produtos na liña, non é o suficientemente óptima.</li> <li>• Mellora da combinación e automatización das variables de entrada ó proceso de fabricación.</li> <li>• Aproveitamento de peles en téxtil.</li> <li>• Toma de imaxes para control da calidade de forma inmediata.</li> </ul>
<p>Identificaches algún caso de uso ó que aplicar a computación cuántica? Cal/Cales?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimización da orde de produción en liña.</li> <li>• Optimización do filtrado e uso das variables de entrada para mellorar o proceso.</li> <li>• Optimización da materia prima.</li> <li>• Mellora e aceleración do procesamento de imaxes en tempo real.</li> </ul>
<p>En que área ves máis probable que axude a computación cuántica á túa empresa? (Optimización, simulación, aprendizaxe automática, criptografía ou outra)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimización.</li> <li>• Aprendizaxe automática.</li> </ul>
<p>Que consideras que é o máis atractivo da computación cuántica para a túa empresa? (Exemplo: velocidade de cálculo, capacidade de abordar problemas complexos, vantaxe competitiva, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redución de tempo pola velocidade de cálculo.</li> </ul>

<p>Detectas algún inconveniente á hora de implantar a computación cuántica na túa empresa? Cal?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Habería que comparar a ganancia da computación cuántica enfrontada co que se usa actualmente.</li> </ul>
<p>Que aspectos cres que poderían ser barreiras para a adopción da computación cuántica na túa empresa? (Exemplo: custos, falta de coñecemento, incerteza, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A financiación.</li> </ul>
<p>Consideraches a inversión en formación e capacitación para que os teus empregados estean preparados para utilizar a computación cuántica nun futuro próximo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si, é necesario.</li> </ul>
<p>Consideraches anteriormente algunha colaboración con institucións de investigación ou empresas especializadas en computación cuántica para facilitar a adopción desta tecnoloxía na túa empresa? En caso negativo, reconsideraríalo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non, pensaba que esta tecnoloxía non aplicaba no seu caso. Mais si o reconsidera.</li> </ul>
<p>Considerarías implementar a computación cuántica a curto prazo? E a longo prazo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si, consideraríao a curto prazo.</li> </ul>
<p>Considerarías realizar un test piloto utilizando este tipo de tecnoloxía?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si.</li> </ul>
<p>Preguntas numéricas 1</p>	
<p>Canto estás familiarizado co concepto de computación cuántica?</p>	<p>1</p>
<p>Canto coñecemento teñen os teus equipos sobre a computación cuántica e a súa potencial aplicación na industria?</p>	<p>2</p>

Cal é o nivel de probabilidade de que implementes algún caso de uso de computación cuántica nos próximos anos?	5
Cres que a computación cuántica podería ter un impacto significativo no ámbito empresarial?	5
Canto che interesa o uso da computación cuántica para resolver problemas na túa empresa?	5
Como de interesado estás en contar con tecnoloxía cuántica?	5
<b>Preguntas numéricas 2</b>	
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a optimización de procesos na túa empresa?	5
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a simulación de procesos na túa empresa?	5
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a aprendizaxe automática na túa empresa?	5
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar os procesos criptográficos na túa empresa?	1

Táboa 24.





## ENTREVISTA 12

### Preguntas de resposta aberta

<p>Existe algún proceso na túa empresa no que se invista moito tempo ou sexa pouco eficiente? Cal? Cres que poderías utilizar a computación cuántica neste caso?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planificar a produción interna (de máquinas, persoas, produtos...) é unha tarefa moi custosa para a que se necesitan varias persoas pendentes.</li> </ul>
<p>Identificaches algún caso de uso ó que aplicar a computación cuántica? Cal/Cales?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planificar a produción interna.</li> <li>• Procesos que se fan a diario. Se se fan unha vez ó ano, non son tan útiles.</li> </ul>
<p>En que área ves máis probable que axude a computación cuántica á túa empresa? (Optimización, simulación, aprendizaxe automática, criptografía ou outra)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimización.</li> </ul>
<p>Que consideras que é o máis atractivo da computación cuántica para a túa empresa? (Exemplo: velocidade de cálculo, capacidade de abordar problemas complexos, vantaxe competitiva, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depende da frecuencia coa que se teñan que facer os cálculos, pero a velocidade de cálculo é interesante.</li> <li>• Tamén a capacidade de cálculo.</li> <li>• A vantaxe competitiva.</li> </ul>
<p>Detectas algún inconveniente á hora de implantar a computación cuántica na túa empresa? Cal?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Os custos.</li> <li>• A seguridade dos datos.</li> <li>• Ter que amortizar o prezo.</li> <li>• O coñecemento non é un problema porque non se necesita saber para usar a tecnoloxía.</li> </ul>
<p>Que aspectos cres que poderían ser barreiras para a adopción da computación</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Respondido na anterior.</li> </ul>

cuántica na túa empresa? (Exemplo: custos, falta de coñecemento, incerteza, etc.)	
Consideraches a inversión en formación e capacitación para que os teus empregados estean preparados para utilizar a computación cuántica nun futuro próximo?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non.</li> </ul>
Consideraches anteriormente algunha colaboración con institucións de investigación ou empresas especializadas en computación cuántica para facilitar a adopción desta tecnoloxía na túa empresa? En caso negativo, reconsideraríalo?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non. Reconsideraríao se tivese coñecemento dos custos.</li> </ul>
Considerarías implementar a computación cuántica a curto prazo? E a longo prazo?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Todo depende dos custos e a protección de datos.</li> </ul>
Considerarías realizar un test piloto utilizando este tipo de tecnoloxía?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se non hai custos consideraríao.</li> </ul>
<b>Preguntas numéricas 1</b>	
Canto estás familiarizado co concepto de computación cuántica?	1
Canto coñecemento teñen os teus equipos sobre a computación cuántica e a súa potencial aplicación na industria?	1
Cal é o nivel de probabilidade de que implementes algún caso de uso de computación cuántica nos próximos anos?	3
Cres que a computación cuántica podería ter un impacto significativo no ámbito empresarial?	1

Canto che interesa o uso da computación cuántica para resolver problemas na túa empresa?	1
Como de interesado estás en contar con tecnoloxía cuántica?	1
<b>Preguntas numéricas 2</b>	
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a optimización de procesos na túa empresa?	2
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a simulación de procesos na túa empresa?	1
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a aprendizaxe automática na túa empresa?	1
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar os procesos criptográficos na túa empresa?	1

*Táboa 25.*

## ENTREVISTA 13

### Preguntas de resposta aberta

<p>Existe algún proceso na túa empresa no que se invista moito tempo ou sexa pouco eficiente? Cal? Cres que poderías utilizar a computación cuántica neste caso?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si, existen varios, hai problemas coa organización de recursos e de fluxos loxísticos porque a demanda é moi variable.</li> <li>• A organización da planta.</li> <li>• Ademais o control de calidade feito a man é mellorable.</li> </ul>
<p>Identificaches algún caso de uso ó que aplicar a computación cuántica? Cal/Cales?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimización da redución de ruído.</li> <li>• Organización de recursos.</li> <li>• Optimización de fluxos loxísticos.</li> <li>• Control de calidade para a localización de defectos.</li> </ul>
<p>En que área ves máis probable que axude a computación cuántica á túa empresa? (Optimización, simulación, aprendizaxe automática, criptografía ou outra)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimización.</li> <li>• Sobre todo na planificación.</li> </ul>
<p>Que consideras que é o máis atractivo da computación cuántica para a túa empresa? (Exemplo: velocidade de cálculo, capacidade de abordar problemas complexos, vantaxe competitiva, etc.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade, melloras no control de calidade e vantaxe competitiva.</li> </ul>
<p>Detectas algún inconveniente á hora de implantar a computación cuántica na túa empresa? Cal?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ten que haber un maior beneficio en comparación co custo investido.</li> </ul>
<p>Que aspectos cres que poderían ser barreiras para a adopción da computación</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Respondido anteriormente.</li> </ul>

cuántica na túa empresa? (Exemplo: custos, falta de coñecemento, incerteza, etc.)	
Consideraches a inversión en formación e capacitación para que os teus empregados estean preparados para utilizar a computación cuántica nun futuro próximo?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non o considerara.</li> </ul>
Consideraches anteriormente algunha colaboración con institucións de investigación ou empresas especializadas en computación cuántica para facilitar a adopción desta tecnoloxía na túa empresa? En caso negativo, reconsideraríalo?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Non o considerara.</li> </ul>
Considerarías implementar a computación cuántica a curto prazo? E a longo prazo?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A curto prazo non, a medio ou longo prazo consideraría.</li> </ul>
Considerarías realizar un test piloto utilizando este tipo de tecnoloxía?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sería complicado, non nun futuro próximo.</li> </ul>
<b>Preguntas numéricas 1</b>	
Canto estás familiarizado co concepto de computación cuántica?	2
Canto coñecemento teñen os teus equipos sobre a computación cuántica e a súa potencial aplicación na industria?	1
Cal é o nivel de probabilidade de que implementes algún caso de uso de computación cuántica nos próximos anos?	1
Cres que a computación cuántica podería ter un impacto significativo no ámbito empresarial?	4

Canto che interesa o uso da computación cuántica para resolver problemas na túa empresa?	1
Como de interesado estás en contar con tecnoloxía cuántica?	2
<b>Preguntas numéricas 2</b>	
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a optimización de procesos na túa empresa?	4
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a simulación de procesos na túa empresa?	4
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar a aprendizaxe automática na túa empresa?	4
En que medida cres que a computación cuántica pode axudar a mellorar os procesos criptográficos na túa empresa?	3

Táboa 26.