LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

OTIMIZAÇÃO QUÂNTICA APLICADA À ALOCAÇÃO DE REDUNDÂNCIAS EM SISTEMAS DA INDÚSTRIA DE ÓLEO E GÁS

Vitoria Milena Alves Bezerra[a,b]
vitoria.milena@ufpe.br
Lavínia Maria Mendes Araújo[a,b]
lavinia.mendes@ufpe.br
Isis Didier Lins[a,b]
isis.lins@ufpe.br
Caio Bezerra Souto Maior[a,b,c]
caio.maior@ufpe.br
Márcio José das Chagas Moura[a,b]
marcio.cmoura@ufpe.br

[a]Centro de Estudos e Ensaios em Risco e Modelagem Ambiental (CEERMA)
[b]Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
[c]Centro de Tecnologia (UFPE)

RESUMO

A indústria de Óleo e Gás (O&G) exige altos níveis de confiabilidade em seus sistemas. Nesse contexto, o Problema da Alocação de Redundâncias (RAP) pode ser utilizado para buscar a configuração ideal de redundâncias com o objetivo de maximizar a confiabilidade. No entanto, devido à complexidade desses sistemas produtivos, abordagens eficientes devem ser exploradas. Este estudo investiga a otimização da confiabilidade de um sistema crítico da indústria de O&G, por meio do RAP, utilizando algoritmos de otimização quântica em instâncias simuladas. O caso abordado consiste no sistema de completação inteligente elétrico. Dois algoritmos são explorados: o *Quantum Approximate Optimization Algorithm* (QAOA) e o *Variational Quantum Eigensolver* (VQE). Por fim, os resultados destacam que, apesar das limitações atuais da computação quântica, existe um potencial destes métodos para aplicações reais da indústria de O&G.

PALAVRAS-CHAVE. Otimização quântica, Problema de alocação de redundâncias, Algoritmos quânticos.

Tópicos: SE-QPO, OC.

ABSTRACT

The Oil and Gas (O&G) industry demands high system reliability levels. In this context, the Redundancy Allocation Problem (RAP) can be used to seek the ideal redundancy configuration to maximize reliability. Efficient approaches must be explored due to the complexity of these productive systems. This study investigates the optimization of reliability for a critical in the O&G industry by applying the RAP and utilizing quantum algorithms on simulated instances. The case addressed includes the electrical intelligent completion system. Two algorithms are explored: the Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA) and the Variational Quantum Eigensolver (VQE). Finally, Despite the current limitations of quantum computing, there is potential for these methods in real applications in the O&G industry.

KEYWORDS. Quantum optimization, Redundancy allocation problem, Quantum algorithms.

Paper topics: SE-QPO, CO.

1. Introdução

Devido à importância econômica da indústria de Óleo e Gás (O&G) e ao ambiente de alta complexidade em que opera, o *design* baseado na confiabilidade dos sistemas produtivos desse setor é crucial. Isso, porque falhas em componentes críticos podem causar paralisações graves e vazamentos de óleo ou gás, resultando em consequências significativas [Aswin et al. 2023].

Diante disso, uma estratégia para proporcionar alta confiabilidade nesses sistemas críticos é a adoção de configurações de componentes redundantes. Nesse viés, a distribuição estratégica de recursos adicionais pode ser modelada pelo Problema da Alocação de Redundâncias (*Redundancy Allocation Problem* - RAP), que envolve a seleção de componentes e níveis de redundância para maximizar a confiabilidade geral do sistema, respeitando restrições como limites orçamentários ou peso limite do sistema [Ouyang et al. 2019].

O RAP já foi explorado por métodos como o *Branch-and-Bound*, Algoritmo Genético e Colônia de Formigas [Konar et al. 2017; Ha e Kuo 2006]. No entanto, uma alternativa crescente para a resolução de problemas de otimização combinatória é o uso de computação quântica (CQ), pois os algoritmos quânticos são baseados em conceitos da mecânica quântica, que oferecem uma opção potencial para lidar com problemas combinatórios em NP (*Nondeterministic Polynomial time*), como o RAP [Araújo et al. 2022].

Assim, este artigo visa investigar a aplicação da otimização quântica em um sistema crítico da indústria de O&G no ambiente *offshore*: o sistema de completação inteligente elétrica (SCI-E). Esse sistema é projetado para monitorar e controlar o fluxo de compartimentos de poços *offshore* e consiste em quatro subsistemas em série: cartões, conectores e duas válvulas de controle de intervalo – ICV [Bouldin et al. 2014]. As válvulas do SCI-E são operadas por uma linha elétrica comum, controlada pelos sinais transmitidos pelos cartões, eliminando a necessidade de uma conexão hidráulica direta e destacando o diferencial do SCI-E. Dadas as atuais limitações da CQ, a investigação é conduzida por meio de instâncias simuladas, propondo uma aplicação inicial utilizando um simulador quântico da IBM.

2. Metodologia

Este estudo divide-se em 2 etapas principais: (1) transformação do RAP em um *Quadratic Unconstrained Binary Optimization* (QUBO); e, (2) aplicação de algoritmos de otimização quântica ao problema QUBO, por meio da biblioteca quântica Qiskit da IBM. Em (1), o RAP foi transformado em um QUBO, que traduz problemas de otimização clássicos em termos de estados e operações quânticas, tendo por objetivo minimizar uma função quadrática binária que incorpora penalidades que representam as restrições do problema original [Wang e Kleinberg 2009]. Neste trabalho, adotou-se a formulação exposta nas Equações (5)-(8), que lineariza as Equações (1)-(4), clássicas da confiabilidade de um sistema paralelo ativo, para adequação do problema às características do QUBO.

Equações clássicas do RAP		**Equações linearizadas do RAP**	
$\text{Max } R(x) = 1 - \prod_{k=1}^{ct}(1-R_k)^{x_k}$	(1)	$\text{Min G} = \sum_{k=1}^{ct}(\sum_{i=nb-1}^{down\ to\ 0} b_{ik}2^i)\, ln(1-R_k))$	(5)
$\text{s.t.} \sum_{k=1}^{ct} x_k \cdot c_k \leq C$	(2)	$\text{s.a.} \sum_{k=1}^{ct} C_k(\sum_{i=nb-1}^{down\ to\ 0} b_{ik}2^i) \leq C$	(6)
$n_{min} \leq \sum_{k=1}^{ct} x_k \leq n_{max}$	(3)	$n_{min} \leq \sum_{k=1}^{ct}(\sum_{i=nb-1}^{down\ to\ 0} b_{ik}2^i) \leq n_{max}$	(7)
$x_k \in \{0, 1, \ldots, n_{max}\}$	(4)	$b_{ik} \in \{0,1\}, i = nb-1, \ldots, 0; k = 1, \ldots, ct$	(8)

Tabela 1: Formulações do RAP.

Nesse sentido, a função objetivo $R(x)$ é a confiabilidade do sistema paralelo ativo para o qual deverá se determinar os tipos de componentes e o número de redundâncias. As variáveis de decisão x_k representam o número de componentes do tipo k alocados ao sistema. Enquanto isso, R_k denota a confiabilidade associada a cada tipo de componente. Os custos associados a cada tipo de componente são expressos por c_k e o orçamento total disponível é representado por C. Por fim, n_{min} e n_{max} impõem limites ao número de componentes alocados ao sistema, considerando limitações físicas ou de configuração [Araújo et al. 2022]. Já na formulação linearizada, b_{ik} são variáveis binárias, i é o índice da posição binária, k é o índice do componente, e nb é a quantidade de números binários usados para representar cada variável.

Assim, neste estudo, as instâncias apresentadas na Tabela 2 simulam redundâncias no subsistema de cartões, uma vez que a falha de sinais desses elementos pode interromper o papel da SCI-E. As diferenças entre as instâncias estão relacionadas à confiabilidade dos elementos analisados, o que impacta diretamente seu valor e utilidade para a indústria de O&G.

Instância 1	ct: 3; $R_1, \dots, R_{ct}$: 0.6086, 0.9860, 0.6999; $c_1, \dots, c_{ct}$: 3,6,5; n_{max}:2; n_{min}:1; C: 6; R_{Con}: 0.9887; R_{ICV1}, R_{ICV2}: 0.9879, 0.9879
Instância 2	ct: 3; $R_1, \dots, R_{ct}$: 0.5281, 0.5170, 0.5297; $c_1, \dots, c_{ct}$: 2,1,3; n_{max}:2; n_{min}:1; C: 4; R_{Con}: 0.9887; R_{ICV1}, R_{ICV2}: 0.9879, 0.9879

Tabela 2: Descrição das instâncias 1 e 2.

Na Tabela 2, R_{Con} e $R_{ICV(1,2)}$ são respectivamente as confiabilidades relacionadas ao conector e às duas válvulas da SCI-E que serão agregadas ao resultado de confiabilidade total dos sistemas analisados.

Posteriormente, na etapa (2), os algoritmos quânticos foram aplicados aos problemas efetivamente. Especificamente, foram usados o *Quantum Aproximative Optimization Algorithm* (QAOA), que utiliza o princípio variacional para aproximar soluções de problemas de otimização, minimizando a energia esperada de um estado fundamental parametrizado, e o *Variational Quantum Eigensolver* (VQE), que combina recursos quânticos e clássicos para otimizar uma estimativa para o menor valor esperado de um observável usando um circuito parametrizado ajustado iterativamente [Blekos et al. 2023].

Ambos os algoritmos, ao receberem instâncias do QUBO, criam um circuito quântico representando o problema, onde os parâmetros inicializados são ajustados iterativamente usando algoritmos clássicos de otimização como, nesse artigo, COBYLA no QAOA e o SPSA no VQE. Esse otimizadores foram selecionados com base na eficiência deles em experimentos anteriores para cada algoritmo. Por fim, o resultado da otimização de subsistemas redundantes é agregado às confiabilidades dos demais equipamentos do sistema, para se obter a confiabilidade do sistema como um todo.

3. Resultados

Os resultados foram obtidos utilizando os algoritmos QAOA e VQE, com uma configuração de circuito (Ry, Ry, Ry + Cz). Cada instância contou com 15 variáveis binárias, correspondendo a 15 qubits, e os parâmetros foram inicializados de forma randômica. Assim, a Tabela 3 descreve os resultados obtidos com as configurações especificadas mediante cada algoritmo em 30 iterações, considerando o ótimo global que era de conhecimento prévio por método exaustivo.

	Instância 1		**Instância 2**	
	QAOA	**VQE**	**QAOA**	**VQE**
Número de soluções viáveis	30	30	30	30
Convergência para a solução ótima	100.00%	90.00%	100.00%	63.33%
Tempo médio de execução	61.52s	275.81s	158.46s	286.16s

Tabela 3: Descrição dos resultados do QAOA e VQE nas instâncias analisadas.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 3, vê-se que, nas configurações analisadas, o QAOA demonstrou uma maior eficiência tanto na convergência para soluções ótimas, quanto no tempo operacional de execução do algoritmo em questão.

	Instância 1	**Instância 2**
Energia ótima	-4.2700	-1.5021
Variáveis de decisão	[0, 1, 0]	[2, 0, 0]
Custo	6	4
Confiabilidade do subsistema com redundância	0.9860	0.7773
Confiabilidade total do sistema	0.9514	0.7500

Tabela 4: Descrição dos resultados ótimos dos subsistemas e gerais.

A análise dos resultados da Tabela 4 mostra que a instância 1 alcança um nível de confiabilidade acima de 95%, considerado desejável na indústria de óleo e gás, apesar de seu custo mais elevado. Em contrapartida, a instância 2, com menor confiabilidade nos cartões, apresenta um custo reduzido, mas com um aumento nos riscos de falha. Essa opção só é aceitável quando o custo é o fator mais crítico, não sendo geralmente adequada para o setor de O&G, onde a confiabilidade é fundamental, dado o potencial de danos ambientais e financeiros significativos.

5. Conclusão

Os resultados obtidos demonstraram que os algoritmos quânticos, apesar das limitações ainda presentes no campo da CQ, como a quantidade de bits quânticos disponíveis nos simuladores, mostram-se aplicáveis no contexto de O&G. Tanto o QAOA quanto o VQE, em conjunto com os otimizadores COBYLA e SPSA, respectivamente, foram capazes de encontrar soluções ótimas para as instâncias analisadas. Todavia, também foi possível observar que o QAOA se destacou nos desempenhos operacionais. Apesar disso, a implementação das configurações ótimas identificadas por meio do RAP proporciona uma melhora na eficiência e na confiabilidade dos sistemas analisados, o que é crucial para garantir o funcionamento adequado e contínuo de sistemas críticos na indústria de O&G.

Este estudo contribui para as pesquisas sobre a aplicação da computação quântica em problemas práticos de otimização em processos industriais, servindo como uma prova de conceito ao demonstrar que esses métodos quânticos analisados já podem alcançar soluções ótimas comparáveis às obtidas pelos métodos clássicos ou exaustivos, mesmo com suas limitações atuais. No entanto, é importante notar que a computação quântica possui desafios para sua aplicação geral. Nesse sentido, futuras pesquisas podem explorar ainda mais esse potencial nos desafios enfrentados pela indústria de O&G e por outros setores.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem às seguintes agências brasileiras de fomento à pesquisa pelo apoio financeiro: CNPq (409701/2022-0, 308924/2021-5, 310892/2022-8, 402761/2023-5), CAPES, Código Financeiro 001. Agradecemos também ao Programa de Recursos Humanos 38.1 (PRH 38.1), financiado pela ANP e FINEP, 044819.

Referências

Araújo, L. M. M., Lins, I. D., Figueroa, D.A.A., Maior, C. B. S., Moura, M.C., Droguett, E. L. (2022). Review of Quantum(-Inspired) Optimization Methods for System Reliability Problems. In Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM (Vol. 16).

Blekos, K., Brand, D., Ceschini, A., Chou, C.-H., Li, R.-H., Pandya, K., & Summer, A. (2023). A Review on Quantum Approximate Optimization Algorithm and its Variants. https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.09198

Bouldin, B., Verma, C., Bellaci, I., Black, M., Dyer, S., Algeryø, J., de Oliveira, T., & Pan, Y. (2014). Prototype test of an all-electric intelligent-completion system for extreme-reservoir-contact wells. SPE Drilling and Completion353-362, 29(3), 353–362. https://doi.org/10.2118/166507-PA

Ha, C., & Kuo, W. (2006). Reliability redundancy allocation: An improved realization for nonconvex nonlinear programming problems. European Journal of Operational Research, 171(1), 24–38. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.06.006

Konar, D., Bhattacharyya, S., Sharma, K., Sharma, S., & Pradhan, S. R. (2017). An improved Hybrid Quantum-Inspired Genetic Algorithm (HQIGA) for scheduling of real-time task in multiprocessor system. Applied Soft Computing, 53, 296–307. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.12.051

Ouyang, Z., Liu, Y., Ruan, S. J., & Jiang, T. (2019). An improved particle swarm optimization algorithm for reliability-redundancy allocation problem with mixed redundancy strategy and heterogeneous components. Reliability Engineering and System Safety, 181, 62–74. https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.09.005

Wang, D., & Kleinberg, R. (2009). Analyzing quadratic unconstrained binary optimization problems via multicommodity flows. Discrete Applied Mathematics, 157(18), 3746–3753. https://doi.org/10.1016/j.dam.2009.07.009