



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA

Relatório Final para prestação de contas de projetos com Fundações de Apoio

1) DADOS

Título da Ação:	Estudo de Algoritmos Quânticos Orientados a Ferramentas de Otimização e Aplicados ao Planejamento Florestal	
Coordenador Gestor (a):	Rodrigo Bloot	
Campus:	Parquetec	
Período de execução:	Início: 17/10/2022	Término: 16/10/2024

2) RESULTADOS

Atividades desenvolvidas: Os participantes envolvidos desenvolveram as investigações de acordo com a carga horária delimitada no plano de trabalho. Todos estavam encarregados de apresentar suas investigações em seminários para discussão com membros da equipe. A organização dos seminários ficou a cargo do coordenador do projeto e tiveram a participação de membros da Klabin envolvidos com o projeto financiado.

A equipe fez a revisão de bibliografia com respeito aos algoritmos *Variational Quantum Eigensolver* (VQE) e *Quantum Approximate Optimization Algorithm* (QAOA). Os algoritmos foram implementados e testados para um conjunto de teste sintéticos com o objetivo de compreender aspectos intrínsecos de sua estrutura.

Foram desenvolvidos estudos com respeito a formulação do problema de plantio de culturas na forma de um problema de otimização inteira. Foram avaliados modelos de programação linear inteira e sua formulação em termos de um QUBO o qual é convertível para problemas da forma do Hamiltoniano de Ising. A formulação sintética do problema florestal foi realizada em conjunto com o pessoal da Klabin. Além disso, a formulação em termos de QUBO permitiu a construção de um Hamiltoniano de Ising que descreve a contraparte quântica do problema o qual é modelado para o uso de 16 qubits. Para efeitos de prova de conceito também foi estudado uma versão do problema do set-packing e caixeiro viajante para a validação da metodologia. A modelagem e formulação por QUBO do problema florestal e dos casos set-packing e caixeiro viajante foram apresentados em seminários do grupo de pesquisa em conjunto com o coordenador da Klabin.

Os métodos foram aplicados no set-packing e no caixeiro viajante (problemas tangencialmente relacionados com o objeto de pesquisa principal do projeto) com o propósito de entender três aspectos do uso destas novas tecnologias: A simulação, a aplicação em dispositivos para uso livre e por fim limitações de escala.

Compreender a estrutura dos simuladores é fundamental para determinar se as formas variacionais aplicadas poderão ser usadas de forma eficiente em futuros dispositivos avaliáveis para uso. A avaliação dos simuladores estudados no contexto dos problemas do set-packing e do caixeiro viajante foram formatados e sumarizados no relatório técnico (ver anexo). Estes



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA

resultados também foram escritos na forma de artigo científico o qual foi submetido em um periódico com revisão por pares. A abordagem foi adotada devido à escassez de qubits.

Quanto ao problema sintético formulado foram aplicados os métodos VQE e QAOA no contexto de simuladores quânticos. Como o problema tem um número mínimo de 16 qubits, não existe na IBMQ um computador real gratuito para uso com tempo hábil a executar o algoritmo. Neste caso, avaliamos a eficiência dos simuladores e comparamos performance e gargalos para a escalabilidade da técnica. Também foi estudada nesta etapa a plataforma fotônica da Xanadu na qual foram avaliadas forma de converter os algoritmos para uso nesta plataforma. Da mesma forma que a IBM, a Xanadu possui simuladores e alguns hardwares disponíveis. No entanto, em meados de 2023 a plataforma retirou acesso livre dos dispositivos com mais qumodes.

Com respeito ao problema, foram analisadas formas variacionais com diferentes arquiteturas de circuitos quânticos com e sem emaranhamento. Além disso, uma análise sobre os tipos de simuladores foi realizada. Como já mencionado, os tipos de simuladores são fundamentais para compreender limitações e dificuldades de natureza intrínseca das formas variacionais adotadas com respeito a convergência. Tal dificuldade impacta a convergência para o “ground-state” do Hamiltoniano que está sendo simulado.

Existem dois tipos de simuladores que exploramos em detalhes, os simuladores variam em sua arquitetura. Avaliamos no detalhe o “*statevector-simulator*” e o “*qasm-simulator*”. O primeiro é baseado na equação de Schroedinger e é um simulador exato e, portanto, sem a possibilidade de simulação de ruído artificial no problema. Já o “*qasm-simulator*” simula um cenário real com maior fidelidade podendo embutir ruído artificial nas simulações. Nossa análise consistiu em avaliar as limitações de cada simulador em situações em que a quantidade de qubits escala. Por fim, também foi analisada o impacto do uso dos otimizadores clássicos COBYLA e SPLQP nas técnicas VQE e QAOA. Também estudamos um efeito indesejado dos métodos híbridos conhecido como platô estéril o qual impõe severos desafios a aplicabilidade destas ferramentas em dispositivos da era NISQ.

Pesquisas sobre os métodos de Grover e Contra adiabático foram realizadas seguindo o cronograma de trabalho na segunda parte da pesquisa após a renovação. Também foram realizadas reuniões de pesquisa junto ao coordenador pela Klabin onde foi discutida as conversões de ferramentas para o uso do Hardware fotônico. O professor Rafael Fortes infante apresentou seminários sobre este tema e estratégias de pesquisa foram abordadas bem como apontamentos sobre certas conversões que são inviáveis devido à natureza bastante distinta dos hardwares.

O algoritmo de Grover foi usado no problema de controle onde suas limitações foram avaliadas. Para ser utilizado, foi necessário converter o problema de otimização em um 3-SAT e um oráculo foi projetado para ser usado pelo Grover. Ficou evidente a dificuldade de escalar esta ferramenta devido à complexidade da construção do oráculo. Estes pontos foram detalhados no relatório técnico entregue para a Klabin (anexos).

Com relação ao método contradiabático, ele foi estudado em detalhes no problema de controle do caixeiro viajante. Apesar de sucesso neste problema, ao ser aplicado no problema sintético florestal o método apresentou overflow. Adaptando esta ferramenta em um modelo variacional híbrido, desenvolvemos o método o qual denominamos contradiabático local em uma abordagem



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA

hibrida. Notamos que em tal abordagem, o número de parâmetros é drasticamente reduzido com respeito ao VQE e QAOA. Os detalhes estão no relatório técnico e os testes no problema sintético florestal foram superiores aos apresentados no artigo publicado por nós (em conjunto com a Klabin) na Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada (anexos). Um artigo sobre VQE e Grover foi submetido em um periódico com revisão por pares e outro sobre o CD-Local está em preparação junto com o pesquisador da Klabin.

Várias reuniões, seminários, atividades e outras iterações com o pessoal da Klabin foram realizadas no período completo da ação. Inicialmente pretendíamos concentrar todas as discussões, mas ao final as reuniões, discussões e apresentações de ferramentas feitas de forma descentralizada ao longo do projeto foi a abordagem que se mostrou mais efetiva no desenvolvimento do projeto.

Um outro tópico previsto no plano de trabalho era um curso de extensão de 20h com o objetivo de prover treinamento introdutório de computação quântica para a comunidade. Nos meses de novembro e dezembro de 2023 foi discutido pela equipe executora a estrutura do curso, com a ajuda do consultor Anton Simen Albino, e a data de sua execução. Este curso está em conformidade com a indissociabilidade entre ensino, pesquisa e extensão. O consultor ajudou a planejar o “*roadmap*” auxiliando no treinamento do IC e ajudando na confecção de códigos para Labs no estilo “*Hands on*”. O consultor também participou das reuniões de pesquisa comentando aspectos críticos sobre o estado da arte.

O curso aconteceu de 15 a 28 de março de 2023 e foi online. As vagas eram 20 com 10 reservadas para alunos de graduação da UNILA e 10 reservadas ao público externo. Devido ao número elevado de inscrições foram liberadas 25 vagas. Tratou-se de um curso de 20 horas. Participantes Internos: A maioria dos participantes internos eram alunos de Engenharia Física da UNILA e um do curso de Engenharia de Energias. Participantes Externos: Os participantes externos eram alunos de graduação/pós-graduação da UNICAMP, UFSCAR, USP, UFRJ, UFSC e UERJ entre outras.

Este curso tinha por objetivo divulgar algumas das ferramentas que estão sendo usadas no projeto de pesquisa em parceria com a Klabin. Um dos objetivos complementares do projeto era a propagação e divulgação de conhecimento para membros da comunidade externa por meio de um curso de extensão. Além disso, queremos colaborar para a implantação de uma rede densa de conhecimento nesta área e que seja espalhada pelo Brasil.

Com relação ao curso uma parte da carga horária era referente a atividades relacionadas com os temas apresentados nas aulas. Também coletamos alguns feedbacks dos participantes com o objetivo de aprimorar ações futuras nesta direção. Abaixo coloco alguns comentários dos cursistas em relação à pergunta: “Descreva em poucas palavras quais eram suas expectativas para o curso e se, em alguma medida, ele foi útil para sua área de formação e interesses profissionais”. As respostas selecionadas foram as dos alunos Nicolas Iunovich Konig (UNILA), Bruno Finazzi (UNICAMP) e Idrissa Deme (UERJ) e seguem na ordem respectiva.

1)“A minha expectativa era a de ter uma noção relacionada ao tema proposto. Ele foi bastante útil a fim de curiosidade e em relação a área de formação, visto que não tinha conhecimento nenhum do tema antes do início do curso”.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA

2) "Minhas expectativas do curso eram aprender mais profundamente como um computador quântico realiza suas operações e como utilizá-los, além de compreender como um computador quântico pode ser muito mais rápido que um computador digital em algumas operações, neste sentido o curso clareou muitas dúvidas, mas ainda sobram muitas especialmente pela limitação da duração do curso".

3) "O curso foi um momento de grande aprendizado para mim. Foi a primeira vez que testei circuitos e vi de fato o funcionamento dos algoritmos de otimizações usando computação quântica. Me permitiu ver aplicações práticas da computação quântica que para mim era uma coisa mais para o futuro. Tive alguns problemas no início para a instalação do Qiskit mas resolvido isso consegui entender boa parte do conteúdo. Gostaria que o curso fosse mais extenso, quem sabe num estilo curso de verão para permitir uma imersão total. Obrigado e parabéns aos professores pela qualidade do curso".

Outros feedbacks foram coletados e acreditamos que o curso foi bem-sucedido no intuito de divulgar ferramentas, ensinar procedimentos práticos e teóricos de um tema muito atual e de importância. Os resultados do curso foram apresentados no evento híbrido Quantum Week na palestra online intitulada "Computação Quântica na Indústria: caso prático e desafios na formação de recursos humanos" realizada em conjunto com Arnaldo Satoru Gunzi coordenador do plano de trabalho pela Klabin. Nesta palestra descrevemos como foi o curso dentro do contexto projeto de pesquisa "Estudo de algoritmos quânticos orientados a ferramentas de otimização e aplicados ao planejamento florestal" e suas repercussões na busca e formação de recursos humanos (veja anexo para verificar o certificado). Por fim, os certificados foram fornecidos pela PROEX da UNILA de maneira que os participantes puderam contabilizar as horas de estudo e dedicação.

Demais alterações no cronograma, não contempladas acima: Não se aplica.

Quantificação da produção intelectual	Quantifique especificando à produção
Dois artigos científicos com manuscritos finalizados.	Um publicado e um submetido (veja anexo).
Artigo científico em preparação sobre o método Contra-Adiabático local.	Este vai ser submetido (baseado em resultado que consta no relatório técnico).
Relatório técnico de projeto.	Entregue a Klabin (veja anexo).
Um curso de extensão.	Curso realizado em 2023 (veja anexo).
Palestra em evento Quantum.	Participação em evento em conjunto com o pesquisador da Klabin.

3) IMPACTO DAS AÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS

Número e descrição da população beneficiada: O projeto focou em dois aspectos críticos desta nova tecnologia, entendimento dos procedimentos e aplicações (relacionado a pesquisa) e formação de recursos humanos (extensão). Com respeito a formação de recursos humanos, o projeto obteve sucesso pois o curso de extensão alcançou 25 participantes contemplando alunos da UNILA, UNICAMP, UERJ, UFSC entre outras. Isto mostra que a necessidade de materiais e cursos nesta área serão cada vez mais demandados à medida que a tecnologia avança.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA

Do ponto de vista da pesquisa, os alunos envolvidos também conseguiram ganhos com respeito a sua formação profissional. Segue abaixo os alunos e ex-alunos envolvidos e seu estágio atual na carreira.

Anton Simen Albino – Ex-aluno do nosso grupo e engenheiro físico formado pela UNILA. No período do projeto estava formado (Seu TCC foi em computação quântica sob a orientação de Rodrigo Bloot) e atuou como consultor. Atualmente trabalha com engenheiro físico (diploma reconhecido na Alemanha) na empresa Kipu Quantum em Berlim.

Gabriel K. de Almeida – Era aluno de engenharia física no período do projeto. Atualmente realiza o mestrado em física aplicada na UNILA.

José D. L. Quintero – Aluno de engenharia física (segundo ano) atualmente aguardando a confirmação de bolsa de IC em uma colaboração com o Parquetec. O tema será em simulação de lógica quântica.

Justificativa dos resultados não alcançados: O projeto tinha metas dentro da realidade e visando provas de conceito e análise de vantagens, desvantagens e viabilidade teórica. Todas as metas foram cumpridas.

4) AVALIAÇÃO DAS AÇÕES REALIZADA

Avaliação do Coordenador Gestor da Ação: O projeto foi executado de forma prevista e os recursos foram executados de acordo com o planejamento. Após o primeiro ano, a Klabin renovou por mais um ano o projeto demonstrando estar satisfeita com o andamento das atividades.

Avaliação dos participantes da Ação: A equipe desenvolveu as tarefas solicitadas e dedicaram-se ao projeto de forma a cumprir tudo o que foi previsto. Foram realizadas uma quantidade bastante significativa de seminários, discussões e treinamento. Portanto, a avaliação é positiva sobre os membros da equipe.

Considerações: Este projeto foi uma experiência enriquecedora no sentido em que manter contato com os profissionais da indústria pode ajudar a UNILA a ser uma referência junto a parceiros que integram cadeias produtivas no cenário nacional. Do ponto de vista da pesquisa, foi possível desenvolver uma ferramenta para diminuir o número de parâmetros com respeito ao que é feito em algoritmos variacionais do tipo VQE e QAOA. Este resultado está sendo compilado em um manuscrito. Porém, seus resultados prévios já estão alocados no relatório técnico que foi entregue para a Klabin. Do ponto de vista de prova de conceito, os resultados são afirmativos quanto a possíveis utilidade destas ferramentas.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA

No entanto, para a continuidade das pesquisas é demandado um orçamento mais robusto. Neste sentido, estamos planejando um projeto junto ao pessoal da Klabin com vistas a buscar recursos em editais da FINEP bem como outras fontes de recurso disponíveis via lei da inovação para em uma próxima etapa avaliar a escalabilidade destas ferramentas. Estes são passos futuros que pretendemos realizar em parceria com a Klabin.

5) ORÇAMENTO

Resumo do orçamento solicitado:	
DESPESAS	Valor
BOLSAS	
Bolsas de Estudo no País	12.000,00
Auxílio Financeiro a Pesquisador (Professor)	57.600,00
SERVIÇOS DE TERCEIROS PESSOA JURÍDICA	
Outros Serviços de Terceiros Pessoa Jurídica	8.720,00
SERVIÇOS DE TERCEIROS PESSOA FÍSICA	
Outros Serviços de Terceiros Pessoa Física (autônomo)	8.000,00
TOTAL DAS DESPESAS	86.320,00

Resumo do orçamento executado:	
DESPESAS	Valor
BOLSAS	Total
Bolsas de Estudo no País	12.000,00
Auxílio Financeiro a Pesquisador (Professor)	57.600,00
SERVIÇOS DE TERCEIROS PESSOA JURÍDICA	
Outros Serviços de Terceiros Pessoa Jurídica	8.720,00
SERVIÇOS DE TERCEIROS PESSOA FÍSICA	
Outros Serviços de Terceiros Pessoa Física (autônomo)	7.999,99
TOTAL DAS DESPESAS	86.319,99

Justificativa dos recursos não utilizados: Os recursos foram usados de acordo com o plano de trabalho. Foram aplicados no pagamento de bolsas de estudos e com o consultor técnico com o pagamento das taxas (seguindo os **arredondamentos** cabíveis). No demonstrativo de gastos também consta o que sobrou devido aos rendimentos da conta realizados pela FEESC. Este montante foi repassado para a UNILA (Veja parte de anexos que contém o extrato de despesas).

Quantitativo Total de Envolvidos na Organização da Ação:

Professores da UNILA	2
----------------------	---



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA

Técnico-administrativos da UNILA	0
Comunidade Externa	2
Bolsistas alunos da UNILA	2
Alunos Voluntários	0

6) ANEXOS

Nesta parte anexamos algumas das produções realizadas pela parceria. Estes anexos contém os prints das primeiras páginas de relatórios, cursos (participantes) e outros produtos intelectuais resultantes desta parceria. Segue a ordem dos prints:

- 1) Relatório técnico de projeto entregue para o representante da Klabin. Neste relatório todos os aspectos da pesquisa estão discutidos. Trata-se de um relatório para uso interno da equipe da UNILA e da Klabin não sendo, portanto, publicizado em todo o seu teor.
- 2) Duas produções, uma submetida para um periódico (**Ciência e Natura**) com revisão por pares junto com o pesquisador da Klabin e outra já publicada na **Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada** a qual também possui revisão por pares.
- 3) Divulgação de alguns resultados do projeto no Linkedin pelo representante da Klabin.
- 4) Três prints sobre o curso de extensão (parte social do projeto) com cartaz, participantes e material. Os materiais foram compartilhados com a Klabin para uso deles em seus treinamentos e fazem parte dos anexos do relatório técnico entregue. Também acrescentei prints das aulas do curso.
- 5) Divulgação, em conjunto com o representante da Klabin, deste caso de formação de pessoas na Quantum Week Brasil (certificado).
- 6) Extrato de devolução do valor remanescente do projeto (das aplicações financeiras) e o extrato de gastos do projeto.