



# MÉTODOS HEURÍSTICOS APLICADOS À OTIMIZAÇÃO DE OPERAÇÕES PORTUÁRIAS EM TERMINAIS MARÍTIMOS DE CARGA

---

**Projeto de Pesquisa enviado ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da  
Computação  
Universidade Federal de Ouro Preto**

---

## **Proponentes:**

Vinícius Gandra Martins Santos - gandra.vinicius@gmail.com  
Candidato

Marco Antonio Moreira de Carvalho – mamc@ufop.edu.br  
Universidade Federal de Ouro Preto – Departamento de Computação

24 de janeiro de 2021

# 1 Introdução

Nas últimas décadas o uso de contêineres em transportes marítimos internacionais tem crescido consideravelmente. Contêineres são grandes caixas de metal mais comumente feitas em uma unidade padrão de medida ou “unidades equivalentes de vinte pés”(twenty foot equivalent units, TEUs). Estes contêineres podem ser *importados* – chegam ao porto transportados por navios e são distribuídos para o continente – ou *exportados* – chegam ao porto transportados por caminhões e trens e são carregados em um navio. UNCTAD (2018), conferência das Nações Unidas sobre comércio e desenvolvimento (do inglês *United Nations Conference on Trade and Development*), estima que em 2017 mais de 9 bilhões de toneladas e 752 milhões de contêineres foram movidos em portos ao redor do mundo, enquanto o comércio global containerizado aumentou 6,4%. Como consequência, os portos de contêineres continuamente investem na otimização de suas operações no intuito de aumentar a capacidade de produção.

Impulsionada pelas taxas de crescimento nas principais rotas marítimas de contêineres, a competição entre os portos de contêineres cresce constantemente. Além disso, a capacidade de transporte da frota de navios em todo o mundo se torna cada vez maior, em 2017 foi observado um crescimento de 3,3% (UNCTAD, 2018). Ganhos significativos de produtividade são alcançados através de melhores leiautes dos portos, sistemas de software de controle de logística, equipamentos automatizados de transporte e manuseio, maior taxa de transferência de contêineres do pátio para as embarcações e vice versa e aplicações de pesquisa operacional e métodos de otimização (Stahlbock e Voß, 2008).

Portos de contêineres podem ser divididos em cinco grande áreas: berço (*berth*), cais (*quay*), transporte, pátio de armazenamento (*storage yard*) e a área do portão do terminal (*gate*). O berço e o cais são considerados à parte a beira mar do terminal, enquanto o pátio e o portão são considerados a parte terrestre (*landside*). A área do transporte é considerada a interseção entre essas duas partes e se encarrega em fazer a comunicação entre elas. A Figura 1 ilustra as cinco grande áreas.

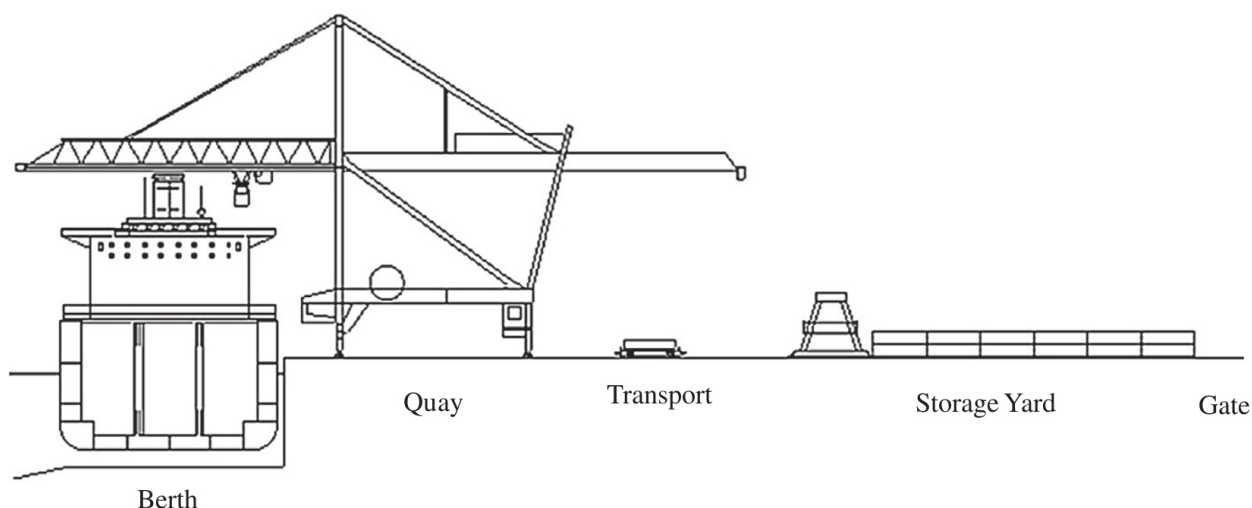


Figura 1: Porto de contêineres (Carlo et al. (2015))

Em linhas gerais, o processo de descarga em um porto de contêineres começa pela chegada de uma embarcação ao porto. Primeiramente, um berço deve ser atribuído para que o determinado navio possa ancorar. Feito a ancoragem, os contêineres são descarregados por um ou mais guindastes do cais de acordo com um plano de descarga. Esses contêineres são transmitidos para veículos de transporte que os levam para o pátio de armazenamento, em que são tipicamente empilhados por outros guindastes no pátio. Os contêineres armazenados no pátio podem ser mais tarde transportados para outro navio

ou então despachados pelo portão do terminal por caminhões ou trens. O processo de carregamento de um navio é basicamente o reverso do processo de descarga, com exceção que este processo segue um plano de carregamento (*stowage plan*), em que cada contêiner deve ser atribuído a uma determinada posição dentro do navio.

A logística dos portos de contêineres tem recebido uma atenção crescente dentro da literatura científica. Diversos trabalhos foram publicados com estratégias individuais para cada grande área portuária, questões operacionais e de controle dos portos de contêineres. Visões gerais desses problemas são apresentadas por Vis e De Koster (2003), Steenken et al. (2004), Murty et al. (2005), Stahlbock e Voß (2008), Boysen et al. (2013), Carlo et al. (2014), Carlo et al. (2015) e Bierwirth e Meisel (2015).

## **1.1 Motivação**

As transações da indústria marítima de transporte de contêineres tem grande impacto na economia mundial. Em 2017 a indústria obteve um lucro de aproximadamente 7 bilhões de dólares (UNCTAD, 2018), impulsionada principalmente por um aumento de volumes transportados, taxas de frete e receita, bem como gerenciamento operacional proativo e disciplinado.

Os processos de um porto de contêineres podem ser divididos em diversos problemas, em que boa parte deles pertencem a classe de problemas NP-Difícil. Alguns exemplos desses problemas são: alocação de berços (Lim, 1998), planejamento do carregamento do navio (Avriel et al., 2000), alocação dos guindastes do berço (Lee et al., 2008) e problema de roteamento do transporte dos contêineres do pátio para o navio (Narasimhan e Palekar, 2002).

Além disso, tendo em vista que um navio passa cerca de 60% do seu tempo atracado em um porto e que aproximadamente 1.000 dólares são gastos a cada hora que o navio está atracado (Kim e Kim, 1999), minimizar o tempo do navio no porto é crucial. Portanto, portos otimizados possibilitam o aumento da produtividade gerando aumento do lucro e da satisfação dos envolvidos. Desta forma, este trabalho pode trazer inovações para os processos portuários, aumentando a eficiência e o desempenho das operações.

## **1.2 Produtos esperados**

Durante a execução deste projeto é esperado a geração de alguns produtos, são eles: a implementação de pelo menos duas ferramentas de inteligência computacional desenvolvidas para a abordagem dos problemas em portos elencados neste projeto; a submissão de pelo menos dois trabalhos completos a congressos científicos nacionais ou internacionais, com possibilidade de apresentação destes trabalhos; a submissão de pelo menos dois artigos completos a periódicos especializados de índice Qualis restrito; a aplicação prática da ferramenta desenvolvida em casos reais da indústria; e relatórios técnicos relativos a cada etapa de desenvolvimento das ferramentas de inteligência computacional.

## **2 Qualificação dos principais problemas abordados**

A logística empregada em portos de contêineres, principalmente dos grandes portos, alcançou um nível muito alto de complexidade, de forma que métodos científicos de otimização são necessários para atingir novas melhorias e auxiliar na tomada de decisão. As seções seguintes apresentam alguns exemplos de processos importantes em portos de contêineres que podem ser otimizados através da aplicação de métodos de inteligência computacional.

## 2.1 Problema de alocação de berços

No problema de alocação de berços (Berth Allocation Problem, BAP) é dado como entrada um leiaute do berço e um conjunto de navios que devem ser atendidos dentro de um horizonte de planejamento. Na versão básica de otimização deste problema, as posições no berço e os tempos para atracar devem ser atribuídos a todos os navios de forma a otimizar uma função objetivo. Uma grande porção de modelos para o BAP foram propostos na literatura para capturar características reais de problemas práticos. As restrições e desafios incluem o tamanho dos navios, profundidade dos berços, janelas de tempo, tamanho e disponibilidade dos guindastes do cais, o local onde os contêineres importados serão posicionados no pátio e a posição dos contêineres que serão exportados, entre outros. Mais ainda, a alocação de berços deve considerar todos os navios que vão atracar em um período de tempo.

Um sistema de alocação de berços automático e otimizado é especialmente importante em casos em que há atraso das embarcações. Neste caso é necessário que um novo berço seja alocado para o navio considerando onde os contêineres estão – ou deverão ser – alocados no pátio. O objetivo é dado, por exemplo, pela minimização do atraso das embarcações ou pela minimização da soma total das distâncias percorridas pelos contêineres do cais até o pátio e vice versa. Algumas das referências importantes deste problema são Wang e Lim (2007), Imai et al. (2014) e Bierwirth e Meisel (2015).

## 2.2 Problema do planejamento de carregamento do navio

O problema do planejamento de carregamento do navio (*Ship stowage planning*) é um problema que possui diversas restrições e depende do planejamento da companhia do navio e do porto de contêineres. É comum que o planejamento feito pela companhia do navio separe os contêineres em categorias, considerando o tamanho, o tipo do contêiner, o porto que deve ser descarregado e o peso. Diferentes seções do navio devem ser preenchidas com diferentes categorias de contêineres. Cabe então ao porto decidir a posição dentro do navio que cada contêiner vai ocupar. As decisões devem também ser tomadas com relação a estabilidade do navio.

Os objetivos podem ser dados pela maximização da produtividade do guindaste do cais, a maximização do uso de espaço no navio, a minimização dos custos, ou a minimização dos rearranjos de contêineres dentro do navio ou no pátio. Rearranjos ocorrem quando um contêiner deve ser acessado enquanto outros estão posicionados por cima. Tais movimentos consomem tempo, reduzem a produtividade das operações e são constantemente o foco principal de otimização neste problema. É possível citar como literatura deste problema os trabalhos de Sciomachen e Tanfani (2007), Monaco et al. (2014), entre outros.

## 2.3 Problema de agendamento de guindastes de cais

O problema de agendamento de guindastes de cais (*Quay Crane Scheduling*) consiste em alocar guindastes de cais para seções do navio, bem como a determinação da sequência dos movimentos de carga e descarga. De três a cinco guindastes podem ser alocados a depender do tamanho do navio. Restrições físicas e históricas devem ser levadas em conta. Considerando que portos crescem ao longo dos anos e possuem diferentes guindantes, é comum que nem todos os guindastes possam chegar em todos os berços. A alocação dos guindastes pode impactar nos navios atracados em berços vizinhos e até mesmo impactar em todos os navios ancorados em um dado período de tempo. Outro grande desafio é sincronizar o movimento de carga e descarga dos guindastes com a chegada dos caminhões que transportam os contêineres do cais para o pátio e vice versa.

Os objetivos são variados, podendo ser a minimização da soma total do atraso de todos os navios, a maximização da performance do carregamento de um navio, ou a minimização do tempo ocioso de um guindaste. O tempo ocioso origina-se da interferência entre guindastes, pois guindastes que

se deslocam no mesmo trilho não podem se cruzar. Essa interferência impede que um guindaste que tenha acabado o seu processamento desloque-se para outra seção do navio. Trabalhos relacionados a esta área são, por exemplo, Chen et al. (2014), Al-Dhaheri et al. (2016), entre outros.

## 2.4 Otimização do transporte

Contêineres são transportados por caminhões, pequenos guindastes (*straddle carriers*) e veículos automatizados, do cais para o pátio, do pátio para o portão e vice versa. O ganho em produtividade de um navio não pode ser necessariamente otimizado através do aumento da frota de transporte, tendo em vista que quanto mais veículos maior o custo para o porto e maior a possibilidade de congestionamento no cais e no pátio. Portanto, um sistema projetado para otimizar este processo deve também lidar com a minimização de congestionamentos.

O processo de transporte pode ser dividido em dois modos. No modo de ciclo único, cada veículo está vinculado a um único guindaste e deve carregar contêineres de importação ou exportação a depender das necessidades do guindaste. No segundo modo, ciclo duplo, os veículos servem vários guindastes que podem estar carregando ou descarregando contêineres. Desta forma, é possível combinar o transporte de contêineres de exportação e importação. O segundo modo é mais eficiente, capaz de reduzir o tempo em que veículos se encontram vazios, no entanto, depende de um esforço maior para otimizar e organizar este processo.

Métodos de otimização com relação a esses problemas tem como objetivo minimizar o tamanho da frota, o tempo de transporte e evitar congestionamentos. Assim como no agendamento de guindastes de cais, é importante sincronizar os transportes com os processos de carga e descarga dos guindastes do cais para evitar tempo ocioso. Exemplos de trabalhos abordando este tema podem ser encontrados em Cheng et al. (2005) e Sterzik e Kopfer (2013).

## 3 Objetivos geral e específicos

De maneira geral, este projeto tem por objetivo desenvolver pesquisa que será utilizada para contribuir com o avanço das operações em zonas portuárias a fim de otimizar seus processos aumentando a produtividade e tornando os portos mais eficientes e competitivos.

### 3.1 Objetivos Específicos

1. Mapear e caracterizar formalmente alguns dos processos produtivos de portos de contêineres, especificamente aqueles que possam ser caracterizados como problemas de otimização;
2. Elaborar métodos heurísticos e metaheurísticos consistentes e robustos que possam ser utilizadas em contextos reais que permitam a obtenção rápida de soluções próximas da solução ótima sem que se perca a vantagem da busca sistemática – inicialmente considerando problemas específicos, mas com uma possibilidade de generalização;
3. Elaborar métodos exatos para tentar resolver de forma ótima a maior quantidade possível de problemas e também encontrar limitantes superiores de qualidade para avaliar a qualidade das soluções geradas pelas heurísticas.
4. Avaliar o comportamento de diferentes formulações para os problemas abordados;
5. Pesquisar técnicas para refinamento de soluções obtidas por heurísticas e metaheurísticas utilizando diferentes técnicas;

6. Buscar a aplicação prática dos métodos desenvolvidos em contextos reais, a fim de que também seja constituído um avanço para os portos de contêineres;
7. Publicar os resultados deste trabalho de pesquisa em periódicos e eventos nacionais e internacionais.

## 4 Metodologia proposta

O início do trabalho de pesquisa se dará por um vasto estudo dos processos que envolvem um porto de contêineres, com a finalidade de compreender todos os processos e identificar os problemas que carecem de melhores soluções. Será realizado o levantamento bibliográfico a respeito dos problemas relacionados e correlatos, a fim de se obter a fundamentação teórica necessária e determinar o estado da arte em questão. As atividades de levantamento bibliográfico consistirão em analisar e classificar todos os trabalhos relacionados, concentrando-se nas publicações minimamente referenciadas e que representem uma contribuição para evolução do estado da arte. Tais publicações serão pesquisadas periodicamente, em bases bibliográficas acadêmicas e também nos sites de pesquisadores, a fim de manter a bibliografia atualizada.

Após a determinação do estado da arte relacionado aos temas da pesquisa, os problemas serão especificados em detalhes, abrangendo aspectos particulares. Em seguida, serão avaliadas as representações computacionais existentes para os problemas especificados, levando em consideração quais características podem ser exploradas e aprimoradas. Novas representações podem eventualmente ser propostas. Com base nas estruturas definidas, o problema será modelado e detalhado. Os modelos escolhidos serão avaliados e validados quanto à sua aplicabilidade e eficácia. Posteriormente serão pesquisados métodos utilizados para modelos equivalentes ou correlatos, a fim de se obter maior embasamento para o projeto das abordagens a serem desenvolvidas.

Métodos iniciais para o tratamento dos problemas serão propostos, implementados e analisados, aprimorando-se as estratégias utilizadas. Tais métodos devem ser exatos e heurísticos. Em paralelo, serão realizadas validações da consistência dos métodos implementados e também testes preliminares que embasarão análises sobre o desempenho e a efetividade das estratégias empregadas.

Os métodos desenvolvidos serão analisados e aprimorados até que se atinja um nível satisfatório de desempenho. Uma vez concluídos os aprimoramentos e implementações, os métodos serão validados e serão submetidos a experimentos computacionais extensivos e também à comparações com métodos disponíveis na literatura. Os métodos desenvolvidos serão analisados qualitativamente a respeito de sua complexidade, desempenho, complexidade computacional e de sua eficácia de acordo com os valores obtidos para a solução média e tempo de execução médio, entre outros critérios estatísticos. Serão utilizados conjuntos de dados disponíveis na literatura, e se possível conjuntos de dados reais, para realização de *benchmarking*. O *benchmarking* permitirá a comparação entre os métodos desenvolvidos e métodos que compõem o estado da arte dos problemas estudados.

A partir de tais dados será possível determinar o avanço obtido em relação ao estado da arte dos problemas tratados. Após a validação dos resultados obtidos, será realizada uma avaliação crítica a respeito do trabalho desenvolvido, abrangendo todas as estruturas e estratégias empregadas. Por fim, a contribuição gerada e a relevância dos resultados obtidos também serão alvo de uma análise crítica, a qual abordará, além destes aspectos, a aplicabilidade dos métodos desenvolvidos.

Cada etapa do trabalho será devidamente registrada para fins de elaboração de relatórios técnicos e artigos. Resultados iniciais relevantes serão compilados em forma de artigos e serão submetidos à periódicos e eventos de áreas relativas ao tema.

## 5 Etapas de execução do projeto com respectivo cronograma de atividades

As atividades deste projeto são elencadas pela lista abaixo. Como o projeto deve abordar diferentes problemas e formas de soluções, algumas atividades são subdivididas em etapas independentes, que consistem em realizar a mesma atividade com temas diferentes.

### 1. Fundamentação Teórica

- 1.1. Estudo e classificação dos principais métodos de resolução apresentados na literatura como de sucesso para a resolução dos problemas considerados e correlatos.

### 2. Especificação dos Problemas

- 2.1. Definição clara e inambígua dos problemas abordados, seus objetivos e restrições, considerando as variações encontradas na literatura, porém, concentrando-se na aplicação prática dos problemas.

### 3. Definição de Estruturas e Modelagem

- 3.1. Avaliação de técnicas e estruturas de inteligência computacional promissoras que não foram ainda consideradas na literatura para os problemas abordados.

### 4. Implementações Iniciais

- 4.1. Projeto e análise experimental de algoritmos exatos;
- 4.2. Projeto e análise experimental de algoritmos construtivos;
- 4.3. Projeto e análise experimental de algoritmos de busca local;
- 4.4. Implementação das técnicas heurísticas e metaheurísticas consideradas mais promissoras para a resolução dos problemas.

### 5. Validação e Testes

- 5.1. Verificação da viabilidade das soluções geradas pelos métodos implementados e testes preliminares considerando conjuntos de instâncias da literatura e dados reais.

### 6. Aprimoramento das Implementações

- 6.1. Reavaliação das estruturas e modelagem utilizadas, propostas de alterações de modo a melhorar o desempenho dos métodos propostos;
- 6.2. Projeto, análise e implementação de técnicas para melhoria fina de soluções (*polishing*).

### 7. Realização de Experimentos Computacionais Extensivos

- 7.1. Avaliação estatística das implementações por meio da realização de *benchmarking* utilizando bases de dados disponíveis na literatura e dados reais advindos da indústria.

### 8. Realização de Estudos Comparativos

- 8.1. Comparação do desempenho dos métodos propostos e os métodos que compõem o estado da arte em relação aos problemas tratados;

- 8.2. Comparação do desempenho dos métodos propostos e os métodos empregados na prática em indústrias;
- 8.3. Análise qualitativa a respeito da complexidade computacional e da eficiência de acordo com os valores obtidos para solução média, tempo de execução médio, convergência e robustez, entre outros critérios.

## 9. Elaboração de Publicações

- ### 9.1. Escrita e submissão de artigos científicos e registro de relatórios técnicos.

## 10. Participação em eventos científicos

- 10.1. Participação em simpósios e congressos nacionais e internacionais, para manutenção de contato com a comunidade acadêmica e o estado da arte relacionado aos temas abordados, além da apresentação do trabalho de pesquisa em seus diversos estágios, quando adequado.

O gráfico de *Gantt* da Figura 2 apresenta o cronograma de execução do projeto de pesquisa, indicando cada uma de suas tarefas. Por se tratar de um projeto com execução de quatro anos, o período de tempo é discretizado em semestres, indicando a duração aproximada para determinada tarefa.

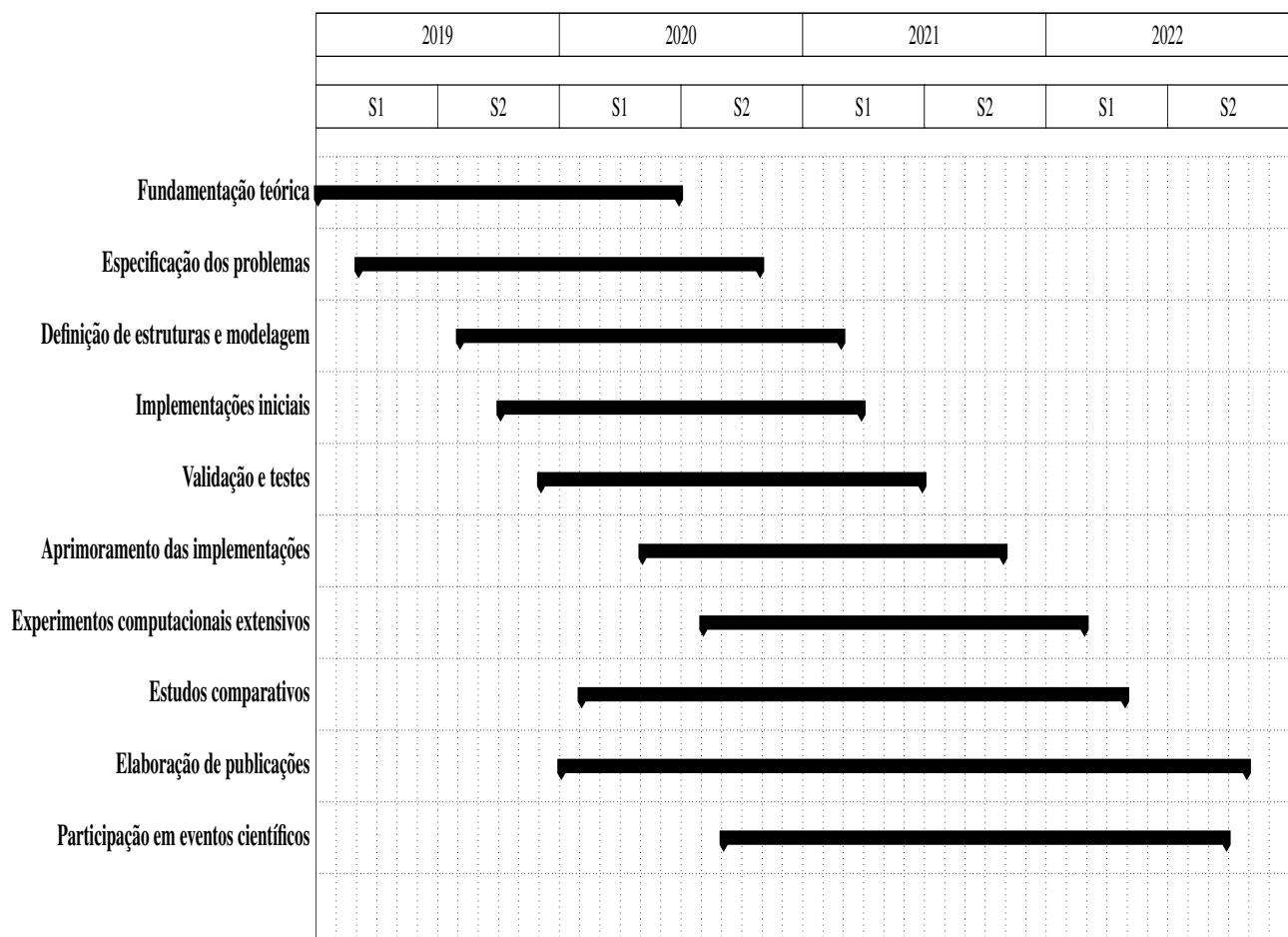


Figura 2: Cronograma de execução das atividades.



## 6 Perspectivas de colaborações interinstitucionais

Os professores do departamento de computação da UFOP, Túlio Ângelo Machado Toffolo e Marco Antonio Moreira de Carvalho, estão em contato com a professora Greet Vanden Berghe da Universidade Católica de Leuven – Bélgica (KU Leuven) para averiguar a possibilidade de cotutela do trabalho proposto. A pesquisadora, Greet Vanden Berghe, é umas das coordenadoras do grupo de pesquisa CODES, dedicado a pesquisa operacional e possui grande afinidade com os temas propostos neste projeto. O candidato a vaga de doutorado, se aprovado, passará uma temporada em cada uma das universidades, dedicando-se ao projeto e demais requisitos dos programas, para ao final obter o diploma de doutor nas duas universidades. A cotutela oferece uma oportunidade de ganho acadêmico e profissional para o aluno além de aumentar a internacionalização dos programas de pós-graduação envolvidos.

## Referências

- N. Al-Dhaheer, A. Jebali, e A. Diabat. A simulation-based genetic algorithm approach for the quay crane scheduling under uncertainty. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 66:122–138, 2016.
- M. Avriel, M. Penn, e N. Shpirer. Container ship stowage problem: complexity and connection to the coloring of circle graphs. *Discrete Applied Mathematics*, 103(1-3):271–279, 2000.
- C. Bierwirth e F. Meisel. A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal of Operational Research*, 244(3):675–689, 2015.
- N. Boysen, M. Flidner, F. Jaehn, e E. Pesch. A survey on container processing in railway yards. *Transportation Science*, 47(3):312–329, 2013.
- H. J. Carlo, I. F. Vis, e K. J. Roodbergen. Storage yard operations in container terminals: Literature overview, trends, and research directions. *European Journal of Operational Research*, 235(2): 412–430, 2014.
- H. J. Carlo, I. F. Vis, e K. J. Roodbergen. Seaside operations in container terminals: literature overview, trends, and research directions. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 27(2-3):224–262, 2015.
- J. H. Chen, D.-H. Lee, e M. Goh. An effective mathematical formulation for the unidirectional cluster-based quay crane scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 232(1): 198–208, 2014.
- Y.-L. Cheng, H.-C. Sen, K. Natarajan, C.-P. Teo, e K.-C. Tan. Dispatching automated guided vehicles in a container terminal. In *Supply chain optimization*, pages 355–389. Springer, 2005.
- A. Imai, Y. Yamakawa, e K. Huang. The strategic berth template problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 72:77–100, 2014.
- K. H. Kim e K. Y. Kim. An optimal routing algorithm for a transfer crane in port container terminals. *Transportation Science*, 33(1):17–33, 1999.
- D.-H. Lee, H. Q. Wang, e L. Miao. Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(1): 124–135, 2008.

- A. Lim. The berth planning problem1. *Operations research letters*, 22(2-3):105–110, 1998.
- M. F. Monaco, M. Sammarra, e G. Sorrentino. The terminal-oriented ship stowage planning problem. *European Journal of Operational Research*, 239(1):256–265, 2014.
- K. G. Murty, J. Liu, Y.-w. Wan, e R. Linn. A decision support system for operations in a container terminal. *Decision Support Systems*, 39(3):309–332, 2005.
- A. Narasimhan e U. S. Palekar. Analysis and algorithms for the transtainer routing problem in container port operations. *Transportation science*, 36(1):63–78, 2002.
- A. Sciomachen e E. Tanfani. A 3d-bpp approach for optimising stowage plans and terminal productivity. *European Journal of Operational Research*, 183(3):1433–1446, 2007.
- R. Stahlbock e S. Voß. Operations research at container terminals: a literature update. *OR spectrum*, 30(1):1–52, 2008.
- D. Steenken, S. Voß, e R. Stahlbock. Container terminal operation and operations research-a classification and literature review. *OR spectrum*, 26(1):3–49, 2004.
- S. Sterzik e H. Kopfer. A tabu search heuristic for the inland container transportation problem. *Computers & Operations Research*, 40(4):953–962, 2013.
- UNCTAD. *Review of Maritime Transport, United Nations publication*. United Nations Conference on Trade and Development, 2018.
- I. F. Vis e R. De Koster. Transshipment of containers at a container terminal: An overview. *European journal of operational research*, 147(1):1–16, 2003.
- F. Wang e A. Lim. A stochastic beam search for the berth allocation problem. *Decision support systems*, 42(4):2186–2196, 2007.