



OTIMIZAÇÃO DOS PROCESSOS DE ESTIVA EM PORTOS MARÍTIMOS ? PARQUE DE CONTENTORES

NUNO MIGUEL PATRÍCIO ROCHA

outubro de 2023

OTIMIZAÇÃO DOS PROCESSOS DE ESTIVA EM PORTOS MARÍTIMOS – PARQUE DE CONTENTORES

Nuno Miguel Patrício Rocha, 1180993

Gestão Industrial

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

Orientadora: Professora Doutora Maria Teresa Ribeiro Pereira

Coorientadora: Professora Doutora Marisa João Guerra Pereira Oliveira

isen

P.PORTO

OTIMIZAÇÃO DOS PROCESSOS DE ESTIVA EM PORTOS MARÍTIMOS – PARQUE DE CONTENTORES

Nuno Miguel Patrício Rocha

1180993

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação da Professora Doutora Maria Teresa Ribeiro Pereira e coorientação da Professora Doutora Marisa João Guerra Pereira Oliveira.

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

AGRADECIMENTOS

A todos os docentes que lecionaram disciplinas no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica, e que, de forma direta ou indireta, contribuíram para o desenvolvimento do meu pensamento crítico, fundamental para a elaboração desta dissertação. Em particular, gostaria de destacar a minha orientadora, a Professora Doutora Maria Teresa Pereira, pela sua orientação cuidadosa e pelo suporte técnico que me concedeu ao longo de todo o processo.

Gostaria de agradecer também à Professora Doutora Marisa Oliveira, que desempenhou um papel fundamental como coorientadora, enriquecendo a abordagem deste trabalho.

Ao Senhor Augusto Matos Martins pela possibilidade que me foi dada de visitar e ficar a conhecer o Terminal de Contentores de Leixões. Sem a sua prestabilidade e disponibilidade esta experiência enriquecedora não teria sido possível.

Ao Doutor Nuno David Silva, Diretor-Geral da Yilport Iberia, pela cedência dos dados utilizados nesta dissertação relativos às operações do TCL/Yilport Leixões de 2020.

Aos meus amigos, cujo apoio constante e motivação foram pilares fundamentais ao longo da minha jornada pessoal e académica. Em especial, gostaria de agradecer ao meu parceiro Diogo Matos que me acompanhou ao longo destes 5 anos de aprendizagem e que se tornou não apenas um companheiro de curso, mas também um amigo para a vida.

Por fim, mas não menos importante, expresso os meus agradecimentos à minha família, que sempre me apoiou em todas as minhas escolhas e fizeram com que este percurso se tornasse possível. As condições que me proporcionaram e a liberdade concedida foram, sem dúvida, peças-chave para o meu sucesso académico e pessoal.

A todos, o meu muito obrigado.

página propositadamente em branco

RESUMO

O transporte marítimo é um importante meio de deslocação que tem um papel vital na economia global, especialmente em Portugal, onde é responsável por 58,5% das mercadorias importadas e 50% das exportações. Nesta dissertação, é analisada a relação entre emissões de poluentes e navios em portos marítimos, destacando a importância da sustentabilidade na indústria marítima. O estudo aborda desafios de otimização nas operações portuárias, apresentando um modelo matemático de otimização para a sua resolução. Os resultados mostram uma redução significativa no tempo de espera e nas operações dos navios, além de uma diminuição notável nas emissões de gases de efeito estufa. Como trabalhos futuros são sugeridas melhorias no modelo, a integração de inteligência artificial, análises económicas mais abrangentes e avaliação da sustentabilidade global. Conclui-se que a procura pela sustentabilidade na indústria marítima não só reduz as emissões, mas também promove operações mais eficientes e responsáveis, apontando para um equilíbrio entre eficiência operacional e responsabilidade ambiental.

PALAVRAS-CHAVE

Logística; Operações em Terminais de Contentores; Sustentabilidade; Berth Allocation Problem; Quay Crane Scheduling Problem.

página propositadamente em branco

ABSTRACT

Maritime transportation is a crucial mean of travel with a vital role in the global economy, especially in Portugal, where it accounts for 58.5% of imports and 50% of exports. This dissertation examines the relationship between pollutant emissions and ships in maritime ports, emphasizing the significance of sustainability in the maritime industry. The study addresses optimization challenges in port operations, introducing an optimization mathematical model for resolution. The results demonstrate a substantial reduction in waiting times and ship operations, along with a notable decrease in greenhouse gas emissions. Future work includes model improvements, integration of artificial intelligence, comprehensive economic analyses, and global sustainability assessments. It concludes that the pursuit of sustainability in the maritime industry not only reduces emissions but also fosters more efficient and responsible operations, aiming for a balance between operational efficiency and environmental responsibility.

KEYWORDS

Logistics; Container Terminal Operations; Sustainability; Berth Allocation Problem; Quay Crane Scheduling Problem

página propositadamente em branco

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABELAS	IX
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivo	2
1.3. Metodologia de Abordagem	2
1.4. Estrutura da Dissertação	2
2. TRANSPORTE MARÍTIMO	4
2.1. Transportes Marítimo: Uma Visão Geral.....	4
2.2. Transporte Marítimo: Transporte de Contentores	5
2.2.1. Conceitos e Dados Essenciais.....	5
2.2.2. Tipos de Contentores	6
2.2.3. Terminal de Contentores	8
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	10
3.1. <i>Berth Allocation Problem</i>	10
3.2. <i>Quay Crane Assignment and Scheduling Problem</i>	10
3.3. Revisão da Literatura.....	11
3.4. Resumo da Revisão Bibliográfica.....	17
4. CASO DE ESTUDO	18
4.1. Definição do Problema e Contexto Inserido	18
4.2. TCL – Terminal de Contentores de Leixões	19
4.3. Formulação Matemática	22
4.4. Descrição e Análise de Resultados	26
4.4.1. Dados Utilizados.....	26
4.4.2. Caracterização dos Parâmetros	27
4.4.3. Resultados Computacionais.....	30
4.5. Impacto no Ambiente.....	36
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	39
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
ANEXO A: Dados dos Navios	48
ANEXO B: Tempo Médio de Atracação	54
ANEXO C: Resultados	57

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Exemplos de contentores com as medidas mais frequentes. Fonte: (SeaRates, 2023).....	6
Figura 2: Fluxo da cadeia de transporte num terminal. Adaptado de: (Steenken et al., 2004).....	8
Figura 3: Exemplos de gruas e guindastes utilizados no Porto de Leixões. Fonte: (APDL, 2023)	8
Figura 4: Layout do Terminal de Contentores Norte. Fonte: (YILPORT Leixões, 2023)	21
Figura 5: Layout do Terminal de Contentores Sul. Fonte: (YILPORT Leixões, 2023)	21
Figura 6: Excerto da Página “ <i>InsertData</i> ” no EXCEL.....	29
Figura 7: Dados do Navio 1 ao Navio 10	29

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Pórticos TCL. Fonte: (YILPORT Leixões, 2023)	19
Tabela 2: Excerto dos Dados dos Navios - TCL	26
Tabela 3: Parâmetros TCL.....	28
Tabela 4: Resultados dos terminais e das gruas obtidos para os 10 primeiros Navios	30
Tabela 5: Resultados das datas obtidos para os 10 primeiros Navios	31
Tabela 6: Valores de Referência dos Fatores de Emissão. Adaptado de: (Hu et al., 2014)	37

página propositadamente em branco

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
TEU	Twenty-Feet Equivalent Unit
FEU	Fourty-Feet Equivalent Unit
BAP	Berth Allocation Problem
QCAP	Quay Crane Assignment Problem
QCSP	Quay Crane Scheduling Problem
QCASP	Quay Crane Assignment and Scheduling Problem
BAPQCASP	Berth Allocation Problem and Quay Crane Assignment and Scheduling Problem
QCYTSP	Quay Crane Yard Truck Scheduling Problem
MIP	Mixed Programming Integer
MILP	Mixed Integer Linear Programming
IP	Integer Programming
LP	Linear Programming
GA	Genetic Algorithm
EA	Evolutionary Algorithm
CP	Constraints Programming
IPCTP	Integrated Port Container Terminal Problem
RTPSO	Random-Topology Particle Swarm Optimization
EEA	Exact Enumerative Algorithm
MOSA	Multi-Objective Simulated Annealing
PSA	Pareto Simulated Annealing
RHH	Rolling Horizon Heuristic
BnB	Branch and Bound
BnC	Branch and Cut
BnP	Branch and Price
RPF	Relative Position Formulation
MRF	MIP-based Relax-and-Fix Algorithm
CDC	Container Division and Combination
BiEA	Bicriteria Evolutionary Algorithm
TCL	Terminal de Contentores de Leixões
TN	Terminal Norte
TS	Terminal Sul

página propositadamente em branco

1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo, é apresentada uma descrição sucinta e contextualização da dissertação, incluindo a relevância do tema em questão. Posteriormente, são formulados os objetivos e as metodologias adotadas para alcançar as metas propostas. Por fim, é exposta a estrutura do trabalho.

1.1. Contextualização

A otimização dos processos de estiva em parques marítimos é essencial para garantir a eficiência e a segurança das operações de transporte de mercadorias pelo mar. A estiva é o processo de carregamento e descarregamento de mercadorias, e é uma das etapas mais importantes e críticas no transporte marítimo, pois afeta diretamente a capacidade de transporte dos navios, a segurança das mercadorias e a eficiência operacional. A otimização dos processos de estiva envolve a escolha da melhor disposição dos contentores no navio, tendo em conta as características e as regulamentações internacionais de segurança, a fim de maximizar a capacidade de carga e minimizar o risco de avarias ou perdas. Além disso, é importante assegurar que os processos de estiva sejam realizados de forma eficiente e segura, utilizando os equipamentos e procedimentos adequados, e garantindo a qualidade das operações (Wilson & Roach, 2000).

A eficiência das operações em parques de contentores é um tema cada vez mais relevante no âmbito da gestão e das cadeias de abastecimento, nomeadamente na otimização dos transportes e da logística, tendo em conta a crescente importância destes equipamentos para o comércio internacional e o transporte de mercadorias. Parques de contentores são instalações onde são armazenados os contentores de transporte de mercadorias, onde é realizada a sua triagem, inspeção, reparação, e acondicionamento antes de serem enviados para outros destinos. A eficiência nestes espaços é crucial, pois permite a otimização da utilização do espaço disponível, a rapidez na realização das operações, aumentando a capacidade de carga e descarga e diminuindo os tempos de espera. Além disso, uma boa gestão dos parques de contentores pode contribuir para a redução dos custos operacionais e para a melhoria da qualidade dos serviços prestados (Roy et al., 2020).

No entanto, a eficiência nestes espaços é ainda um desafio, devido à complexidade das operações, às limitações do espaço e de recursos disponíveis e à necessidade de se assegurar a segurança e a integridade das mercadorias armazenadas. É importante mencionar ainda as restrições logísticas e de movimentação devido aos limites físicos e regulamentares do porto, assim como a capacidade de tratamento dos equipamentos de movimentação e transporte. Para alcançar uma elevada eficiência, é fundamental que os parques de contentores sejam bem planeados e geridos, tendo em conta as suas características e as necessidades dos utilizadores. A utilização de tecnologias avançadas, tais como sistemas de gestão de armazéns e sistemas de rastreamento de contentores, pode ser uma grande ajuda neste sentido (Arbia & Sami, 2019).

Outro fator importante é a colaboração e a comunicação eficazes entre as diferentes entidades envolvidas nas operações de transporte e logística, tais como os trabalhadores, as

transportadoras, os armazéns e as autoridades portuárias, para garantir a coordenação e a eficiência das operações.

É neste contexto que surge o desenvolvimento desta dissertação que irá incidir na otimização dos diversos procedimentos relacionadas com todo o processo de estiva em portos marítimos, uma vez que, a eficiência das operações em parques de contentores é um aspeto crucial para o transporte e a logística de todo o tipo de mercadorias.

1.2. Objetivo

Nesta dissertação, propõe-se explorar e analisar a ampla variedade de modelos matemáticos e heurísticas presentes na literatura existente, avaliando diferentes sistemas de apoio à tomada de decisão para operações em terminais de contentores em portos marítimos. Seguidamente, será desenvolvido um modelo de otimização baseado em Programação Linear Inteira Mista (MILP) para a resolução do problema em questão. Este modelo será validado e comparado com dados reais fornecidos pelo Porto de Leixões, a fim de verificar sua eficácia na melhoria das operações portuárias. Além disso, com os resultados obtidos através do modelo, será possível quantificar e perceber as quantidades significativas de emissões de poluentes que podem ser poupadas através da otimização dos processos portuários, contribuindo assim para a promoção de práticas mais sustentáveis no setor.

1.3. Metodologia de Abordagem

Como metodologia de trabalho, este relatório começa por realizar uma revisão minuciosa da literatura existente sobre o tema proposto, a fim de identificar as lacunas e limitações existentes no conhecimento atual. Com base nessa revisão, será desenvolvido um modelo otimização operacional para abordar o problema em questão. Este modelo será validado usando instâncias criadas a partir de dados reais do Porto de Leixões.

1.4. Estrutura da Dissertação

Nesta seção, será detalhada a estrutura adotada para a elaboração desta dissertação.

No Capítulo 1 é efetuada uma contextualização do tema abordado e uma breve descrição dos seus objetivos e metodologia utilizada ao longo da sua redação, bem como é apresentada a organização da dissertação.

No Capítulo 2 é fornecida uma visão geral acerca do tópico dos transportes marítimos e o seu papel num contexto global como forma de introduzir o leitor no tema, destacando conceitos chave. Este capítulo também inclui informações sobre o transporte de contentores e os tipos de contentores utilizados, bem como uma breve descrição acerca de terminais de contentores.

No Capítulo 3 é apresentada a revisão bibliográfica da literatura mais relevante na área pretendida. Essa revisão incluirá uma análise detalhada das principais fontes existentes na eficiência das operações de contentores em portos marítimos, proporcionando uma base sólida para o posterior desenvolvimento de um modelo.

No Capítulo 4 é descrito o caso de estudo, incluindo a definição do problema e o contexto do Terminal de Contentores de Leixões (TCL). É também apresentada a formulação matemática desenvolvida e, posteriormente, são apresentados e analisados os resultados obtidos, considerando o perfil dos dados, caracterização dos parâmetros e seu consequente impacto ambiental.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste estudo, bem como possíveis direções para trabalhos futuros, destacando áreas que requerem investigação adicional.

2. TRANSPORTE MARÍTIMO

De forma a introduzir o leitor no tema, neste capítulo é fornecida uma visão geral acerca do tópico dos transportes marítimos e o seu papel num contexto global.

2.1. Transportes Marítimo: Uma Visão Geral

O transporte marítimo é um importante meio de deslocação que envolve o uso de navios e outras embarcações para transportar pessoas, materiais e bens por rios, mares ou oceanos. Este tipo de transporte desempenha um papel vital na economia global e, segundo o (Instituto Nacional de Estatística, 2021), em Portugal, este tipo de transporte é responsável por 58,5% de todas as mercadorias importadas, contabilizando um total de 34,7 milhões de toneladas. No que diz respeito às exportações, é responsável por 50,0% do volume total, somando 17,9 toneladas deslocadas, no ano de 2021.

O transporte marítimo é geralmente dividido em duas categorias principais: transporte comercial e transporte de passageiros. O transporte comercial envolve o movimento de mercadorias, como matérias-primas e produtos finais, enquanto o transporte de passageiros se refere ao transporte de pessoas, incluindo turistas e migrantes (UNCTAD, 2021).

Segundo (European Environmental Agency & European Maritime Safety Agency, 2021; UNCTAD, 2021), é possível enumerar várias vantagens no que toca à utilização dos transportes marítimos, essencialmente na sustentabilidade, como por exemplo:

- **Capacidade:** Os navios conseguem transportar grandes quantidades de carga;
- **Custo efetivo:** O transporte marítimo é geralmente menos dispendioso quando comparado com outros modos de transporte, especialmente para longas distâncias.
- **Eficiência do combustível:** As embarcações são mais eficientes em termos de combustível do que aviões e camiões, resultando em custos mais baixos de combustível por distância percorrida;
- **Pouco poluente:** O transporte marítimo produz uma menor quantidade de gases com efeito estufa, relativamente ao transporte rodoviário e aéreo;
- **Flexibilidade:** Os navios podem viajar para uma ampla gama de destinos, incluindo áreas remotas que não são acessíveis por terra.

Contudo, apesar das suas vantagens também possui algumas desvantagens:

- **Baixa Velocidade:** Apesar da sua eficiência, os navios são mais lentos do que aviões e comboios, o que os torna menos adequados para cargas sensíveis ao tempo;
- **Dependência de terminais portuários:** O transporte marítimo depende de terminais portuários para a carga e descarga de mercadorias, o que pode influenciar o tempo de entrega;
- **Complexidade da cadeia de abastecimento:** O transporte marítimo envolve uma cadeia de abastecimento complexa, uma vez que, está dependente de um elevado número de

intervenientes, é condicionado pelas diferentes regulamentações dos vários países, é suscetível a atrasos devido a fatores climáticos adversos e envolve um sistema logístico e de distribuição complexo.

Em via de conclusão, os transportes marítimos constituem uma parte vital do sistema de transporte global, possuindo um grande papel na economia mundial, o que o torna num tópico fundamental de discussão e análise com vista a garantir a sua segurança e eficiência, bem como a sua contribuição para o desenvolvimento sustentável.

2.2. Transporte Marítimo: Transporte de Contentores

O transporte de contentores é um modo de transporte de carga muito utilizado a nível mundial, especialmente em rotas comerciais internacionais desde o seu surgimento na década de 60 do século passado.

O transporte de contentores é uma das formas mais eficientes de transporte de carga, pois permite o transporte de grandes quantidades de mercadorias de uma só vez, o que reduz o tempo de transporte e, conseqüentemente, os custos.

2.2.1. Conceitos e Dados Essenciais

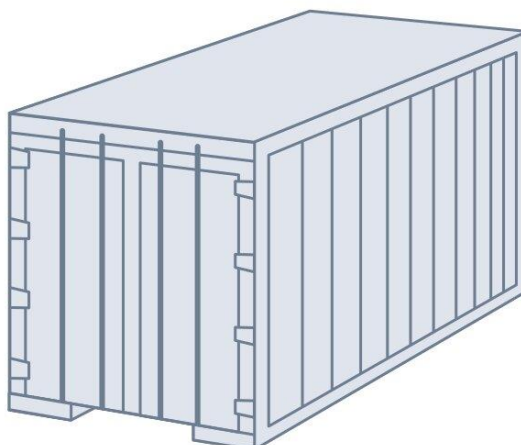
Os contentores são equipamentos normalizados, construídos em aço ou até madeira que servem para transportar largas quantidades de mercadorias de um lugar para outro, tanto por via terrestre, com o auxílio de camiões e comboios, quer por via marítima, com a utilização de navios e embarcações. Esta versatilidade, aliada aos seus tempos de vida, que rondam os 10 e 15 anos, facilita o processo de carga e descarga, o que permite facilmente a continuidade da cadeia de transporte e abastecimento.

Atualmente, são elementos fundamentais e predominantes no mercado de transportes, não só pela sua grande capacidade de carga, mas também pela sua segurança e pela forma que integram a cadeia logística como um todo, de forma intermodal, permitindo uma maior interconexão com os outros meios de transporte. Os contentores são ferramentas imprescindíveis para o transporte de carga pois minimizam todas as operações e ações durante o transporte, uma vez que foram pensados e projetados para facilitar ao máximo este tipo de transporte, facilitando o carregamento e o descarregamento das mercadorias, bem como a sua transferência entre os diferentes meios de transportes, o que economiza tempo e reduz o risco de danos à carga durante as transferências.

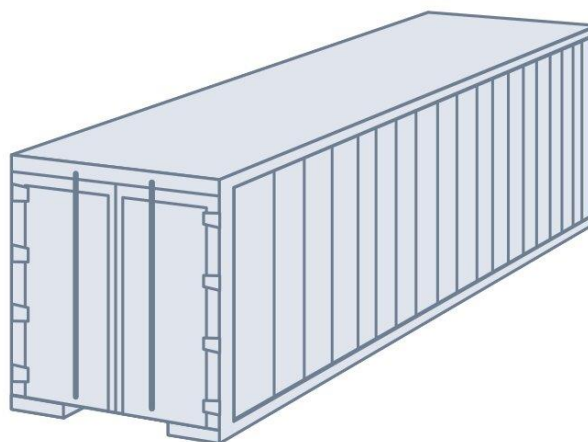
Devido à sua normalização, os contentores possuem dimensões padronizadas em medidas inglesas (pés), sendo a unidade básica utilizada o TEU (*twenty-feet equivalent unit*), unidade que equivale a 20 pés, aproximadamente 6 metros de comprimento. Esta unidade de medida é adotada por todo o mercado de transporte contentorizado e é utilizada como forma de medir a produtividade dos terminais de contentores, permitindo comparar as quantidades de contentores movimentadas.

2.2.2. Tipos de Contentores

Existem várias tipologias de contentores conforme os requisitos da carga a movimentar. No que diz respeito ao seu comprimento, os contentores mais frequentes são de 20' (pés), medida que corresponde a 1 TEU, e os de 40', medida que é igual a 2 TEU, como ilustra a Figura 1. **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** De notar que 2 TEU equivale a 1 FEU (*fourty-feet equivalent unit*). Em relação às suas larguras, ambos possuem 8' e 8'6" de altura. Contudo, existem também contentores de 23', 26', 30' e 45'.



b) Contentor de 20', equivalente a 1 TEU



a) Contentor de 40', equivalente a 1 FEU

Figura 1: Exemplos de contentores com as medidas mais frequentes. Fonte: (SeaRates, 2023)

É responsabilidade do expedidor garantir que as suas mercadorias são corretamente embaladas e colocadas no contentor apropriado, de forma a assegurar a sua segurança durante o transporte. Os contentores podem ser de diferentes tipos e tamanhos, dependendo do tipo de carga que transportam e de suas especificidades. De seguida, são enumeradas algumas das designações mais comuns, juntamente com as suas características:

- **Contentores *Dry Cargo* (Carga Seca):** Estes são o tipo mais comum de contentor e são usados para transportar mercadorias secas, como por exemplo, roupa, componentes eletrónicos ou mobiliário.

- **Contentores *High-Cube* (Alto Volume):** Estes contentores são mais altos e mais espaçosos do que os padrão (9.6 pés, o que equivale a aproximadamente 2.93 metros), o que permite o transporte de mais mercadorias num único contentor. São principalmente usados para transportar produtos volumosos, com baixa densidade.
- **Contentores *Open-Top* (de Topo Aberto):** Estes contentores têm uma abertura no topo e são geralmente usados para transportar itens sobredimensionados, onde a carga ou descarga das mercadorias é impossível de se realizar pelas portas finais ou laterais. Estão disponíveis em comprimentos de 20 pés ou 40 pés e, geralmente, têm uma lona removível para cobrir o topo do contentor durante o transporte.
- **Contentores *Flat Rack* (Plataforma):** Estes contentores têm um fundo sólido e não têm paredes nem teto, sendo adequados para o transporte de itens sobredimensionados ou de formato irregular. Estão disponíveis em comprimentos de 20 pés ou 40 pés e podem ter laterais móveis que podem ser dobradas para baixo quando não estão em uso.
- **Contentores *Pallet Wide* (Largos de Paletes):** Estes contentores facilitam o transporte de mercadorias empalelizadas e estão disponíveis em comprimentos de 20, 40 ou 45 pés.
- **Contentores Refrigerados:** Estes contentores são usados para transportar mercadorias consumíveis, como por exemplo alimentos, que precisam de ser mantidos a baixas temperaturas. Possuem um sistema interno de refrigeração ou congelamento que mantém uma temperatura desejada durante o transporte.
- **Contentores Isotérmicos:** Estes contentores são usados para transportar mercadorias que precisam de um controlo de temperatura especial, como medicamentos ou produtos químicos. Face aos contentores refrigerados, possuem um sistema interno de refrigeração ou aquecimento que mantém uma temperatura constante durante o transporte.
- **Contentores Tanque:** Estes contentores são usados para transportar líquidos. Possuem um tanque de aço inoxidável no seu interior e estão equipados com sistemas de tubagens e válvulas para o carregamento e descarregamento dos líquidos. São, exclusivamente, de 23, 26 e 30 pés.
- **Contentores de Alta Segurança:** Estes contentores são feitos de materiais mais resistentes e são munidos de sistemas de fecho mais seguros e sofisticados. São usados para transportar mercadorias de alto valor ou de alto risco.
- **Contentores Especializados:** Estes contentores são desenhados para tipos específicos de mercadorias e podem ter características como paredes reforçadas, divisórias internas ou sistemas de ventilação específicos. Exemplos de contentores especializados incluem contentores para materiais perigosos, para transporte de animais ou contentores de resíduos.
- **Contentores Modulares:** Estes contentores são desenhados para serem facilmente montados e desmontados, sendo apropriados para aplicações temporárias ou móveis. Podem ser usados para vários fins, como habitações, escritórios ou para armazéns.

2.2.3. Terminal de Contentores

Os Terminais de Contentores são um segmento de um porto marítimo onde é feita a carga e descarga dos contentores provenientes dos navios e, posteriormente, armazenados e parquoados de forma facilitar o fluxo da cadeia de transporte.

Segundo (Steenken et al., 2004), os terminais estão divididos em duas grandes áreas: o cais e a área terrestre. O cais corresponde à zona de embarque e desembarque dos navios e onde acontece o processo de carga e descarga. A área terrestre, divide-se em duas subzonas: o parque, onde os contentores são empilhados e armazenados, segundo parâmetros como por exemplo, o navio, o destino e o peso, e a zona de *hinterland*, que corresponde à interface de comunicação entre todos os meios de transporte associados, de onde faz parte a portaria, como é possível verificar na Figura 2.

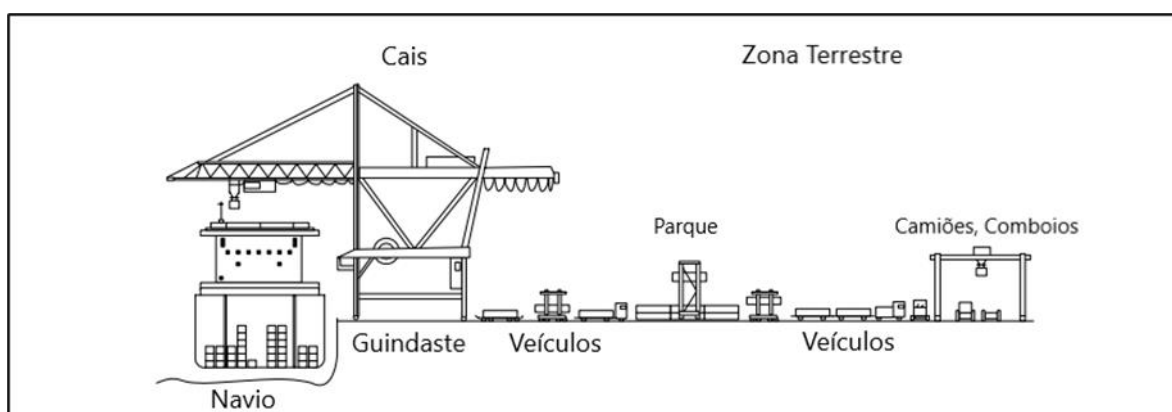


Figura 2: Fluxo da cadeia de transporte num terminal. Adaptado de: (Steenken et al., 2004)

Estas movimentações são realizadas com a utilização de diversos equipamentos e veículos, como guias e guindastes, pórticos, empilhadoras, camiões, veículos automáticos, entre outros (Figura 3).

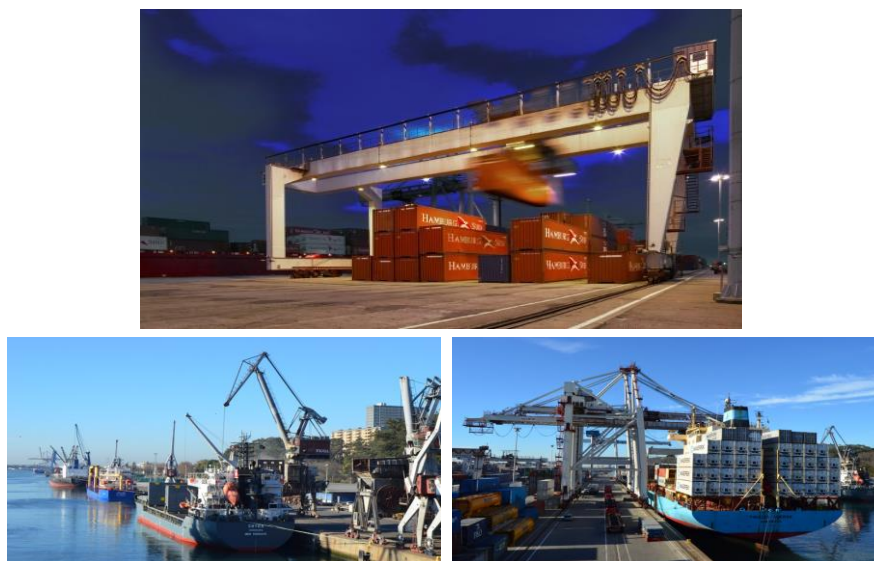


Figura 3: Exemplos de guias e guindastes utilizados no Porto de Leixões. Fonte: (APDL, 2023)

Assim que um navio chega ao cais, é-lhe atribuído uma zona de atracação onde será realizado o processo de descarga, com a utilização de um guindaste de cais. É nesta operação que surgem os primeiros problemas relacionados com a eficiência do terminal.

O primeiro, está relacionado com a atribuição da zona de atracação ao navio (*Berth Allocation Problem, BAP*), que pode ser resolvido através do pressuposto *first come first served*, primeiro a chegar primeiro servido, em que os navios são atracados por ordem de chegada, o que minimiza o tempo em que um navio se encontra no terminal, ou seguindo o pressuposto em que os navios são atracados no local mais próximo onde os seus contentores serão parqueados, o que pode conduzir à formação de filas de espera (Steenken et al., 2004). No subcapítulo 3.1, serão abordadas com mais detalhe diversas formulações para a resolução deste problema.

O segundo, está relacionado com a atribuição dos guindastes do cais ao navio (*Quay Crane Assignment and Scheduling Problem, QCAP e QCSP*), com vista a otimizar a sequência de movimentos realizados pelas gruas no processo de carga/descarga, reduzindo o tempo de operação em cada navio. No subcapítulo 3.2, serão exploradas em maior profundidade várias formulações para solucionar esses desafios.

Em última análise, o comércio mundial é fortemente influenciado pelo transporte marítimo, o que torna os terminais de contentores infraestruturas de grande importância. É neste contexto que a logística e a gestão destes serviços tem cada vez mais evoluído, de forma a otimizar todo o fluxo da cadeia de transporte.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, serão discutidos os estudos mais significativos relacionados aos temas que serão investigados nesta dissertação, isto é, será feita uma análise da literatura sobre o *Berth Allocation Problem* (BAP), o *Quay Crane Scheduling Problem* (QCSP) e o *Quay Crane Assignment Problem* (QCAP).

3.1. *Berth Allocation Problem*

Berth Allocation Problem (BAP) é um problema de otimização comum na área do planejamento de operações em portos marítimos. Refere-se ao processo de atribuir zonas de atracação (*berths*) aos navios num terminal de contentores. O objetivo é encontrar uma alocação que minimize o tempo total de atracação e desatracação dos navios, maximizando assim a eficiência do porto.

Existem diferentes variáveis envolvidas no BAP, como a duração de atracação e desatracação de cada navio, as restrições de capacidade das zonas de atracação, a ordem de chegada e saída dos navios, entre outros. Além disso, muitos problemas BAP também consideram limitações de tempo de atracação, como janelas de tempo de chegada, e restrições de capacidade de outros recursos portuários, como as gruas de cais (Bierwirth & Meisel, 2010; Li et al., 2015).

Existem diversos métodos para resolver o BAP, tais como métodos exatos, heurísticas e meta heurísticas, nomeadamente algoritmos de Programação Inteira (IP, na sigla em inglês), Programação Inteira Mista (MIP, na sigla em inglês), Algoritmos Genéticos (GA, na sigla em inglês), Simulação, entre outros. A complexidade do problema varia com o número de navios e zonas de atracação, e também com as restrições e os objetivos específicos do problema.

3.2. *Quay Crane Assignment and Scheduling Problem*

Quay Crane Assignment Problem (QCAP) e *Quay Crane Scheduling Problem* (QCSP) são problemas de otimização relacionados às operações de gruas de cais nos portos marítimos.

O QCAP é um problema de atribuição que tem como objetivo atribuir os guindastes aos navios que chegam ao porto, com o objetivo de minimizar o tempo total de operação das gruas e maximizar a eficiência do porto. O problema envolve decisões como qual grua deve ser atribuída a qual navio, a ordem de operação das gruas e a ordem de chegada e saída dos navios.

Já o QCSP é um problema de programação que tem como objetivo estabelecer um horário de operação para as gruas num porto, de forma a minimizar o tempo total de operação dos guindastes e maximizar a eficiência do porto. Assim, envolve decisões como quando é que as gruas devem ser operadas, qual grua deve ser usada para qual navio e como os navios devem ser abordados (Bierwirth & Meisel, 2010; Li et al., 2015).

Em resumo, o QCAP é um problema de atribuição de gruas a navios e o QCSP é um problema de estabelecimento de horários de operação para as gruas, ambos visando maximizar a eficiência do porto e minimizar o tempo de operação. A integração destes dois problemas pode ser denominada de QCASP.

3.3. Revisão da Literatura

Os primeiros artigos publicados acerca da literatura em questão datam de 1989 quando Daganzo (1989) apresentou um dos primeiros modelos para resolver o problema de agendamento de guias de cais nos portos marítimos, com o principal objetivo de reduzir o tempo de atracação dos navios no cais e, assim, minimizar o custo total de espera para todos os navios. Este autor dividiu o problema em duas situações: numa situação estática e noutra dinâmica. Para a resolução da situação estática, o autor formulou um problema MIP que obtém resultados muito perto do ótimo, mas apenas com um reduzido número de navios, considerando que o cais só pode alojar um número fixo de navios e apenas uma grua pode atuar em cada compartimento. O problema dinâmico é estudado de forma semelhante, mas os navios que vão chegando aos cais também são considerados. Contudo, se os navios começarem a formar fila, a formulação torna-se mais complexa e não é apresentada. Para este caso, o autor apresenta uma estratégia baseada em princípios e critérios definidos.

Lim (1998), transforma o BAP numa versão restrita de um problema *two-dimensional packing* e representa num modelo de grafos o problema de forma sucinta. Com especial foco na restrição de não cruzamento dos braços das guias, Zhu e Lim (2006) abordam o problema em questão com o objetivo de minimizar o tempo de conclusão dos trabalhos e é formulado um modelo de programação inteira limitado pelo tamanho das instâncias usadas. Para instâncias de tamanho médio, os resultados obtidos através do algoritmo de *Branch-and-Bound* (BnB) utilizado superam o desempenho do modelo matemático no CPLEX e, para instâncias maiores, utilizam o algoritmo SA (*Simulated Annealing*) que origina soluções ótimas ou muito próxima da ótima. No artigo de Imai et al. (2008) os autores formularam os problemas BAP e QCAP através de um GA, onde não têm em consideração a relação entre o tempo de operação e o número de guias.

Mais tarde, Meisel e Bierwirth (2009) fornecem um modelo matemático para a resolução do BACAP, bem como dois métodos heurísticos que permitem a resolução do problema para instâncias de tamanho prático (entre 20 e 40 navios), a heurística *Squeaky Wheel Optimization* (SWO, na sigla inglesa) e a heurística *Tabu Search* (TS, na sigla em inglês). Os resultados mostram que a utilização destas heurísticas fornece soluções de boa qualidade com um menor tempo de processamento, abaixo das 10 horas limitadas. Uma vez que o tempo de atracação está diretamente relacionado com o número de guias que atuam em simultâneo no navio, Liang et al. (2009), apresentaram um estudo que considera o BAP e o QCAP em simultâneo, com o objetivo de minimizar a soma dos tempos de atuação, o tempo de espera e o tempo de atraso de cada navio. Os autores optaram por utilizar o Algoritmo Genético (GA, na sigla inglesa), combinando-o com heurísticas e, assim, criar um conceito de hibridização capaz de obter melhores resultados. Golias et al. (2009) abordaram o problema de agendamento de atracação com base na chegada dos navios dentro de limites pré-estabelecidos face aos horários fixos tradicionalmente utilizados na chegada dos navios. O problema foi formulado como um problema de otimização inteira mista e uma heurística baseada em GA foi utilizada para aproximar o resultado à realidade. Os resultados mostram que esta política de agendamento, em que o operador do terminal decide o horário de chegada dos navios, pode ser mais benéfica tanto para a companhia de navegação como para o operador do terminal.

No ano seguinte, Bierwirth e Meisel (2010) elaboram uma revisão de todas as investigações realizadas até à data onde comprovaram que determinar e classificar o tempo de manobra dos

navios é uma necessidade, difícil, mas crucial para o planejamento das operações costeiras, fulcral para a eficiência das cadeias de abastecimento. Os autores concluem também que o crescente interesse nos modelos de integração tem vindo a ganhar cada vez mais popularidade, uma vez que, é capaz de fornecer soluções equilibradas em relação aos subproblemas desenvolvidos. Segundo C. Zhang et al. (2010), o problema é formulado como um modelo de programação inteira mista e é construído um algoritmo de otimização de sub-gradiente para a sua resolução, onde levam em consideração os alcances de cobertura dos guindastes de cais e apenas permite ajustes limitados durante o carregamento e o descarregamento. Este estudo destaca a eficácia do algoritmo ao lidar com problemas reais e sugere a incorporação de fatores incertos no modelo para aproximar cada vez mais as soluções à realidade. Han et al. (2010) desenvolveram um modelo MIP que aborda os problemas de atribuição e agendamento de guias de forma simultânea (QCAP e QCSP), tendo em conta incertezas e atrasos relacionados com a chegada do navio, bem como o tempo de manobra dos guindaste do cais. Neste modelo, os navios chegam de forma dinâmica e aleatória e as guias podem atuar em diferentes atracções mesmo antes de terminarem o navio que lhes foi previamente atribuído. Para auxiliar este método é aplicado um procedimento de busca baseado no GA, que gera horários tanto de atracção como de guias de forma proativa. No artigo apresentado por Xu et al. (2012), o BAP é modelado como um problema de programação paralela com restrições de conjunto de processamento inclusivo, onde a atribuição de embarcações a atracções é limitada pela profundidade da água e condições da maré (maré alta e maré baixa), onde o objetivo é minimizar a duração total ponderada do serviço das embarcações, considerando os custos de espera unitários das embarcações. Em contraste, Chang et al. (2010) primeiramente desenvolvem um modelo dinâmico de programação objetiva baseado na técnica de *rolling-horizon* para a formulação do BAP e do QCAP. Seguidamente, foi desenvolvido um *Hybrid Parallel Genetic Algorithm* (HPGA, na sigla em inglês) que combina um algoritmo genético em paralelo com uma heurística, originando soluções práticas e eficazes para os problemas em questão. No artigo de Barros et al. (2011) os autores propõem um modelo de Programação Linear (LP, na sigla em inglês) para resolver o BAP em portos de carga a granel com restrições de nível de stock. Como nos resultados apresentados era difícil uma estimativa precisa acerca do tempo necessário, um algoritmo SA foi proposto como uma alternativa válida, produzindo resultados robustos com um tempo de processamento satisfatório, em 90% dos testes (instâncias) realizados.

Face a literaturas de anos anteriores, Raa et al. (2011) voltam a abordar o BAP e o QCAP em simultâneo e têm em consideração novas características e restrições como é o caso das prioridades dos navios, os locais de atracção preferenciais e o tempo de manobra. Os autores utilizam um modelo de programação linear mista (MILP, na sigla inglesa) e resolvem-no em intervalos de tempos, com a utilização da *Rolling Horizon Heuristic* (RHH, na sigla inglesa), uma vez que, é fundamental a resolução deste problema várias vezes ao dia num porto marítimo real. Um ano mais tarde, Yang et al. (2012) apresentaram um modelo que promove a interação entre o BAP e o QCAP com o desenvolvimento de um Algoritmo Evolutivo (EA, na sigla inglesa) constituído por 3 *loops*. Os primeiros *loops* resolvem os subproblemas de BAP e QCAP com base num GA e um terceiro *loop* externo, envolve os dois primeiros com o objetivo de encontrar uma solução aproximada com base nos nestes. Em Song et al. (2012), os problemas de BAP e QCSP são formulados

através de uma abordagem de *Bi-Level Programming* (BLP, na sigla inglesa), onde o BAP é considerado o problema de nível superior e o QCSP o de nível inferior. Com o objetivo de minimizar o tempo de espera total, um algoritmo GA e um método BnB são aplicados posteriormente para melhorar a solução. No artigo de Chen et al. (2012) foi desenvolvido um novo método denominado Combinatorial Benders' Cuts algorithm (CBC, na sigla inglesa) onde revelam que a abordagem proposta é mais eficiente do que o algoritmo Branch-and-Cut (BnC, na sigla inglesa) incorporado no CPLEX. De acordo com a abordagem de Kaveshgar et al. (2012), os autores optam por desenvolver um GA, onde utilizam uma nova abordagem para a definição dos cromossomas (a representação da solução) para reduzir o número de variáveis de decisão, bem como a introdução de novos procedimentos para calcular limites inferiores e superiores mais precisos para as variáveis de decisão. Os resultados experimentais mostram que o modelo fornece soluções mais rapidamente para problemas maiores em comparação com as melhores soluções conhecidas. Com o objetivo de ter em conta as variações de profundidade da maré ao longo dos diferentes berços, Sheikholeslami et al. (2013) desenvolveram um GA em combinação com um algoritmo de pesquisa de padrões para resolver o BAP formulado, tendo verificado que a heurística apresentada apenas produz soluções eficazes para pequenas instâncias.

Em contraste com outros estudos que procuram desenvolver algoritmos de busca mais complexos, no artigo de Chen et al. (2014), o objetivo é propor uma formulação matemática mais concisa para o problema de agendamento de guindastes de cais, com base num agrupamento unidirecional, que possa ser resolvido de forma simples por um solver convencional. No que diz respeito a condições de posicionamento dos guindastes de cais e as restrições de não cruzamento, no artigo de Diabat e Theodorou (2014) é desenvolvido um GA para resolver o QCASP e conclui-se que este algoritmo é uma abordagem bem-sucedida, produzindo soluções quase ótimas para problemas de tamanho pequeno e médio, com um desempenho extremamente eficiente em termos de tempo para todos os tamanhos de problema.

No artigo de Carlo et al. (2015) é abordado o panorama geral das operações marítimas nos terminais de contentores e destaca as suas tendências e desenvolvimentos, analisando e classificando os artigos de científicos publicados entre 2004 e 2012. Zhen (2015) aborda o problema através de duas formulações distintas com o intuito de lidar com a incerteza do tempo de operação dos navios. Do ponto de vista estocástico, é apresentada uma formulação de programação estocástica capaz de lidar com diferentes distribuições de probabilidade para o desvio de tempo de operação. Além disso, é proposta uma formulação robusta que se aplica a situações em que há informações limitadas sobre as distribuições de probabilidade. Os resultados obtidos neste estudo mostram que a formulação robusta é capaz de obter uma solução quase ótima para o modelo estocástico de forma rápida, apresentando ainda a vantagem de limitar os piores resultados possíveis. Além disso, as instâncias realizadas demonstraram a eficiência e eficácia dos algoritmos meta-heurísticos propostos em comparação com o solver CPLEX. Por outro lado, Theodorou e Diabat (2015) desenvolveram um modelo para a formulação matemática do problema QCASP e uma heurística de Relaxamento Lagrangeano (RL, *Lagrangian Relaxation*, na sigla inglesa) para resolver o problema. Com esta análise, conclui-se que os problemas com instâncias pequenas e médias são resolvidos rapidamente, contudo, para problemas maiores, o seu desempenho é comprometido em termos de limites e o tempo computacional aumenta devido ao incremento extremo das variáveis. Assim, esta heurística foi considerada uma

abordagem bem-sucedida para o QCASP, especialmente quando aplicada a instâncias de problemas pequenos e médios. Hu et al. (2014) abordam a resolução do BQCAP, considerando o consumo de combustíveis e as emissões do navio, onde é destacada a proporcionalidade inversa existente entre o custo operacional do porto e o consumo de combustível. Além disso, é analisado o impacto do número ótimo de guindastes nas emissões dos navios enquanto atracados no cais.

No ano de 2015, Bierwirth e Meisel (2015) continuam a revisão da literatura de Bierwirth e Meisel (2010) que cobria a pesquisa até ao ano de 2009. Nesta revisão, os autores analisam e classificam mais de 120 novas publicações e identificam as abordagens mais inovadoras e reconhecem diversas lacunas na investigação que podem ser alvo de novos estudos. Ainda nesse mesmo ano, Al-Dhaheri e Diabat (2015) formularam um problema ideal para pequenas e médias instâncias. Neste artigo, os autores utilizam a MILP para determinar a sequência de operações de descarga de um navio que uma grua irá realizar de modo a minimizar o tempo de operação. Apesar de considerarem restrições que elevam a complexidade do problema, como gruas bidirecionais e a capacidade de se moverem entre docas antes de terminar as tarefas alocadas, a solução originada é uma solução simples e precisa, uma vez que, a função objetivo tem como finalidade minimizar a diferença relativa entre a carga dos contentores e o número de cais. No artigo de Iris et al. (2015), os autores propõem uma formulação GSPP, (*Generalized Shift-Invariant Set Partitioning*) para o BACAP considerando políticas de atribuição de guindastes de cais variantes e invariantes no tempo. Estes modelos são resolvidos através do Solver presente no CPLEX e apresentam bom desempenho em termos de limites superiores e inferiores. Já na perspectiva de Ursavas e Zhu (2016), os autores propõem uma estrutura baseada numa abordagem de programação dinâmica estocástica para modelar o BAP, tendo em consideração a presença de incertezas nos horários de chegada e nos tempos de operação e concluíram que a política de controlo ótima é baseada num ponto de referência e depende do número de navios alocado num certo conjunto de berços.

Türkoğullari et al. (2016) propuseram um modelo para integração dos problemas BAP, QCAP e QCSP. Primeiramente, formularam um problema MILP que origina uma solução exata para as posições e tempo de atracação dos navios, juntamente com o agendamento das gruas para a estadia dos navios nas docas. Seguidamente, utilizaram o método de *BnB* numa sequência de decomposição onde o problema é resolvido em intervalos de tempo num *master problem* e depois é realizada uma procura pela solução ótima para o agendamento das gruas, através da resolução de subproblemas. Com esta abordagem concluíram também que os subproblemas gerados são do tipo *NP-complete*, uma vez que, são concebidos através da redução de um problema *NP-hard*. No mesmo ano, Liu et al. (2016) no seu artigo, dividem os problemas de BAP e QCSP em duas fases, de modo a construir um modelo que lide com as constantes perturbações que ocorrem num terminal de contentores, como, por exemplo, a avaria de gruas a meio do agendamento formulado anteriormente. Assim, na primeira fase utilizam o método *MIP-based Relax-and-Fix Algorithm* (MRF, na sigla inglesa) para obter soluções ótimas para o BAP e, na segunda fase, aplicam uma técnica dinâmica de programação para resolver o QCSP. Ao contrário de, Karam e Eltawil (2016) que, ainda no mesmo ano, integram funcionalmente os problemas de BAP, QCAP e QCSP numa estrutura de *loop* de *feedback*. Deste modo, foi possível considerar as atribuições de cais variáveis no tempo, aproximando mais a solução da realidade. Em Al-Dhaheri et al. (2016) é proposta uma nova formulação MIP do QCSP que leva em consideração as restrições de estabilidade dos navios. Devido à complexidade do problema é proposto um GA e os

resultados computacionais validam o modelo em problemas de pequeno porte e destacam o desempenho do GA desenvolvido.

Na ótica de Mauri et al. 2016, os autores encontraram uma solução para o BAP através da formulação de uma heurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS, na sigla inglesa) onde os navios são representados por retângulos a serem alocados numa área espaço-tempo, respeitando restrições temporais e de sobreposições. Os resultados obtidos indicam que a heurística ALNS é capaz de gerar soluções de alta qualidade e quando comparadas com as restantes heurísticas concorrentes demonstram melhorias estatisticamente significativas. No artigo de Qin et al. (2016), os autores mostraram que a Programação por Restrições (CP, na sigla inglesa) tende a ser superior a modelos de IP em diversos casos e que a criação de um procedimento híbrido de CP/IP pode ser um meio simples para aumentar a otimalidade da solução.

Já no ano de 2018, Agra e Oliveira (2018) apresentam um modelo matemático baseado na integração dos problemas BAP e QCASP. Primeiramente, é construído um modelo com base na *Relative Position Formulation* (RPF, na sigla inglesa) para os parâmetros da atribuição de cais. Seguidamente, um novo modelo é introduzido para evitar restrições de *big-M* incluídas no RPF e resulta de uma discretização das variáveis de tempo e espaço. É apresentada ainda uma heurística RHH e uma abordagem BnC para ajudar a resolver problemas de grandes instâncias. Contudo, esta metodologia não considera alguns aspetos importantes como a capacidade de armazenamento dos contentores e as incertezas associadas a certos acontecimentos. Z. Zhang et al. (2018) estendem a formulação do problema de agendamento de gruas de cais (QCSP) tendo em consideração as restrições de estabilidade do navio. Os autores propõem um *Bicriteria Evolutionary Algorithm* (BiEA, na sigla inglesa) para encontrar soluções promissoras e introduzem uma *Sliding-Window Heuristic* para corrigir os agendamentos que não cumpriram as restrições de estabilidade.

Abou Kasm e Diabat (2019) no ano seguinte, abordaram o QCSP com a introdução de restrições de distância mínima de segurança entre as gruas e sem cruzamento para um único navio, ao que denominaram de QCSP-NS. Através da formulação do problema em IP, os autores propõem uma abordagem de dois passos começando pela introdução de uma técnica chamada *Container Division and Combination* (CDC, na sigla em inglês) e, seguidamente, reformulam o problema como um problema de partição e executam o algoritmo de *Branch and Price* (BnP, na sigla inglesa) para encontrar a solução mais próxima da ótima. Mais tarde, Abou Kasm et al. (2020) voltaram a considerar a integração dos três problemas. Os autores apresentam uma nova formulação matemática onde é tido em conta diferentes políticas operacionais das gruas de cais, como a permissão ou não de preempção de tarefas de cais no QCSP e a alocação estática ou dinâmica das gruas no QCAP. Para a resolução desta nova formulação foi utilizado um software comercial.

No artigo de Kizilay et al. (2020) são propostos uma série de modelos de CP para resolver o *Integrated Port Container Terminal Problem* (IPCTP, na sigla em inglês). O IPCTP, consiste na integração dos problemas descritos anteriormente na revisão, juntamente com a atribuição e agendamento das gruas de cais, bem como a sua localização, e a programação dos camiões que fazem a movimentação dos contentores dentro do terminal portuário. Neste seguimento, Malekahmadi et al. (2020) apresentaram um modelo de programação inteira para o agendamento dos problemas integrados, BAPQCASP, considerando o impacto da profundidade da água na atracação dos navios. Nos casos de maior dimensão, o modelo integrado não apresentava

resultados em tempos razoavelmente curtos, o que levou os autores a desenvolverem um algoritmo *Random-Topology Particle Swarm Optimization* (RTPSO, na sigla em inglês).

No ano seguinte, Skaf et al. (2021) compararam os resultados obtidos através de um *Exact Enumerative Algorithm* (EEA, na sigla inglesa) e de um GA com um caso real, na resolução do problema QCYTSP (*Quay Crane Yard Truck Scheduling Problem*), considerando uma única grua de cais e vários caminhões de transporte para o parque, com base na formulação MILP. Desenvolveram um modelo para o problema integrado BAPQCASP onde consideram que os tempos de chegada dos navios podem sofrer atrasos e incertezas. Nesse mesmo ano, Rodrigues e Agra (2021) propõem um modelo matemático de duas fases, em que as decisões de atracação são decisões de primeira fase e as atribuições de gruas são decisões de segunda fase. Os autores seguem um algoritmo de decomposição para dividir o problema num problema principal e num problema de separação e, para auxiliar a resolução de instâncias de grandes dimensões, o algoritmo de decomposição é combinado com o algoritmo *Rolling Horizon*.

Por fim, no artigo Nourmohammadzadeh e Voß (2022) é descrita uma pesquisa sobre um modelo robusto para agendar as operações de terminais marítimos de contentores, levando em conta possíveis cenários de chegadas de navios e disponibilidade de gruas. Vários métodos de solução são propostos e comparados, incluindo o *Multi-Objective Simulated Annealing* (MOSA, na sigla inglesa) e o *Pareto Simulated Annealing* (PSA, na sigla em inglês).

3.4. Resumo da Revisão Bibliográfica

Em via de conclusão, neste subcapítulo é apresentada uma revisão detalhada sobre os estudos mais significativos relacionados com os temas que serão investigados na dissertação, incluindo o *Berth Allocation Problem* (BAP), o *Quay Crane Scheduling Problem* (QCSP) e o *Quay Crane Assignment Problem* (QCAP). Ao longo da redação, é exposta uma descrição clara e precisa dos problemas de otimização relacionados à operação de portos marítimos, destacando as variáveis envolvidas, os objetivos e as restrições.

O *Berth Allocation Problem* é um problema de otimização comum na área do planeamento de operações em portos marítimos e refere-se ao processo de atribuir zonas de atracação aos navios num terminal de contentores, tendo como objetivo encontrar uma alocação que minimize o tempo total de atracação e desatracação dos navios, maximizando assim a eficiência do porto. Existem diferentes variáveis envolvidas no BAP, como a duração de atracação e desatracação de cada navio, as restrições de capacidade das zonas de atracação, a ordem de chegada e saída dos navios, entre outros. Além disso, muitos problemas BAP também consideram limitações de tempo de atracação, como janelas de tempo de chegada, e restrições de capacidade de outros recursos portuários, como as gruas de cais. Existem diversos métodos para resolver o BAP, incluindo modelos de programação inteira, algoritmos genéticos e simulação. A complexidade do problema varia com o número de navios e zonas de atracação, e também com as restrições e os objetivos específicos do problema.

O *Quay Crane Assignment Problem* (QCAP) e o *Quay Crane Scheduling Problem* (QCSP) são problemas de otimização relacionados às operações de gruas de cais nos portos marítimos. O QCAP é um problema de atribuição que tem como objetivo atribuir os guindastes aos navios que chegam ao porto, com o objetivo de minimizar o tempo total de operação das gruas e maximizar a eficiência do porto. O problema envolve decisões como qual grua deve ser atribuída a qual navio, a ordem de operação das gruas e a ordem de chegada e saída dos navios. Já o QCSP é um problema de programação que tem como objetivo estabelecer um horário de operação para as gruas num porto, de forma a minimizar o tempo total de operação dos guindastes e maximizar a eficiência do porto. Assim, envolve decisões como quando as gruas devem ser operadas, qual grua deve ser usada para qual navio e como os navios devem ser abordados. A integração destes dois problemas pode ser usada para otimizar ainda mais a operação do porto.

4. CASO DE ESTUDO

Neste capítulo será descrita a estrutura detalhada do problema, assim como, os diversos parâmetros e considerações que servirão de base para a formulação matemática desenvolvida, com o objetivo de obter soluções otimizadas e mais sustentáveis para as operações de estiva em portos marítimos.

4.1. Definição do Problema e Contexto Inserido

O problema em questão visa otimizar a alocação de navios aos berços de atracagem, distribuindo o trabalho de manobra de contentores entre as gruas atribuídas a cada navio, tendo em consideração restrições como o comprimento dos navios, a disponibilidade das gruas e o espaço nos terminais de ancoragem. Este complexo desafio é especialmente relevante para o contexto do Terminal de Contentores de Leixões (TLC), onde a eficiência operacional e a correta utilização dos recursos são de extrema importância. Através de uma formulação matemática detalhada, procura-se encontrar uma solução que minimize o tempo total de espera dos navios no porto, isto é, o tempo decorrido desde a chegada do navio ao porto, até ao momento em que as operações de carga/descarga são iniciadas. A diminuição deste intervalo de espera revela-se de extrema importância no âmbito da sustentabilidade do porto, uma vez que, os navios em espera continuam a consumir combustível e a emitir gases com efeito de estufa que são prejudiciais ao meio ambiente. Além disso, promove uma manobra de contentores mais eficaz e fluida, resultando em benefícios significativos tanto para a gestão portuária quanto para os navios envolvidos.

Este problema surge em consonância com a busca incessante pela sustentabilidade e eficiência operacional nos portos marítimos contemporâneos. À medida que a indústria marítima enfrenta crescentes demandas pela produtividade e pela redução do impacto ambiental, a otimização dos processos de estiva emerge como um componente crítico para atingir esses objetivos. A necessidade de minimizar o tempo de espera dos navios não reduz apenas as emissões poluentes, mas também aprimora a utilização dos recursos portuários, maximizando a capacidade de movimentação de contentores. Diante deste cenário desafiador, o desenvolvimento e aplicação de modelos matemáticos, aliados à implementação de estratégias operacionais eficientes, contribuem para uma gestão portuária mais sustentável, económica e amiga do ambiente.

No contexto específico do Terminal de Contentores de Leixões, o qual desempenha um papel vital nas cadeias logísticas regionais e internacionais, a otimização dos processos de estiva e a redução do tempo de espera dos navios podem impulsionar não somente a competitividade do terminal, mas também a vitalidade económica e ambiental da região em que está inserido.



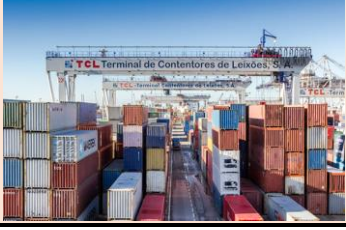
4.2. TCL – Terminal de Contentores de Leixões

Situado na costa norte de Portugal, o Porto de Leixões oferece um ponto de acesso estratégico ao Oceano Atlântico e a importantes rotas de navegação. A sua localização privilegiada contribui para uma ligação eficaz com os principais mercados europeus e globais, posicionando o TCL como uma plataforma essencial para o comércio marítimo.

O TCL destaca-se pela sua infraestrutura de classe mundial, incluindo diversos berços de atracagem, guindastes modernos (como é possível visualizar através na Tabela 1) onde estão descritos todos os pórticos presentes no TCL, e espaços amplos para a armazenagem. A adoção de tecnologias inovadoras, como sistemas de rastreamento, automação portuária e software de otimização, melhora a eficiência operacional e reduz o impacto ambiental, alinhando-se com a busca pela sustentabilidade.

Tabela 1: Pórticos TCL. Fonte: (YILPORT Leixões, 2023)

	Designação	Quantidade	Capacidade de Carga nos Cabos	Capacidade de Carga no Spreader	Capacidade de Twin-Lift
	Pórtico de Cais STS - Poc	2	45 ton	35 ton	-
	Pórtico de Cais STS - Poc	1	45 ton	35 ton	-
	Pórtico de Cais STS - Poj	1	68 ton	40 ton	2x17 ton
	Pórtico de Cais STS - Pol	2	80 ton	40 ton	2x30 ton
	Pórtico de Parque RMG - Pod	2	45 ton	35 ton	-

	Pórtico de Parque RMG - Poe	2	45 ton	35 ton	-
	Pórtico de Parque RMG - Poh	2	45 ton	35 ton	-
	Pórtico de Parque RMG - Poi	2	45 ton	35 ton	-
	Pórtico de Parque RMG - Pok	4	50 ton	35 ton	-

Na Figura 4 e na Figura 5 , são ilustrados os layouts detalhados do Terminal de Contentores de Leixões, destacando as configurações específicas das áreas Norte e Sul do terminal, respetivamente. Estas representações visuais fornecem uma visão abrangente da disposição das instalações, áreas de armazenamento e a localização estratégica das gruas para a movimentação de contentores. Através destes layouts, é possível observar a organização espacial dos terminais e compreender a distribuição para a alocação eficiente de navios e a realização das operações de carga e descarga. Estes layouts proporcionam uma representação visual dos espaços do terminal, permitindo a visualização da localização dos pontos de atracação, as áreas de armazenamento, os guindastes e outros equipamentos, bem como o fluxo de tráfego.

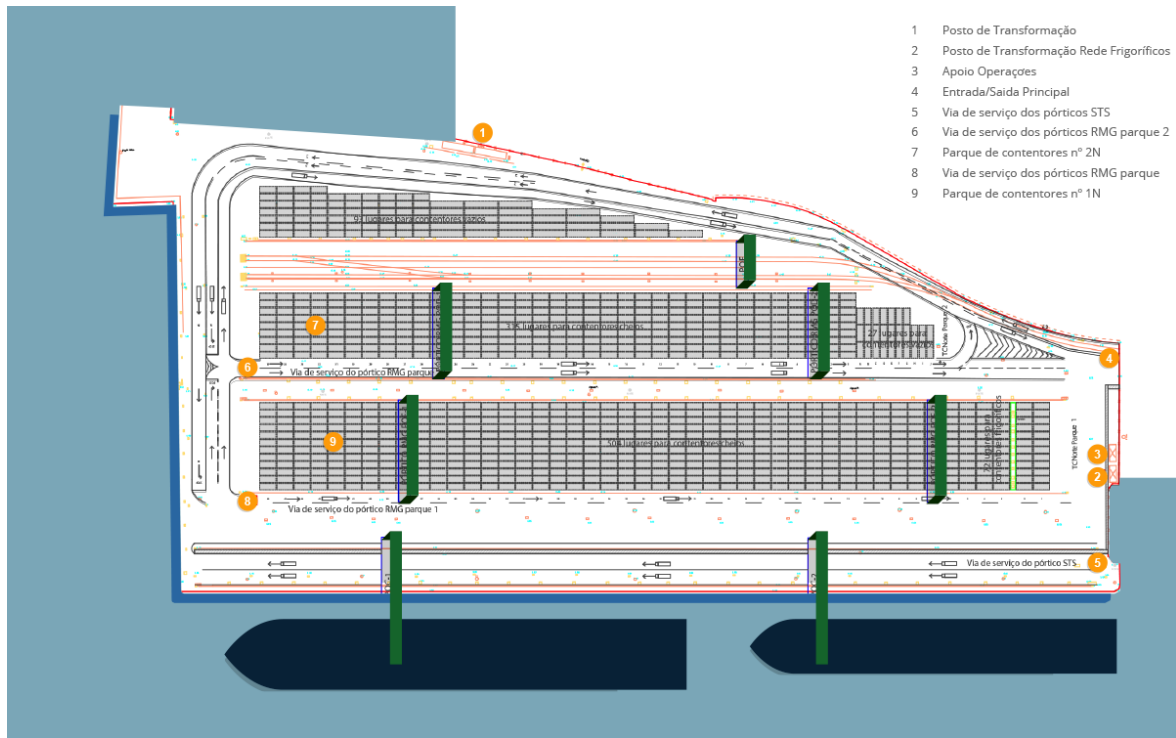


Figura 4: Layout do Terminal de Contentores Norte. Fonte: (YILPORT Leixões, 2023)

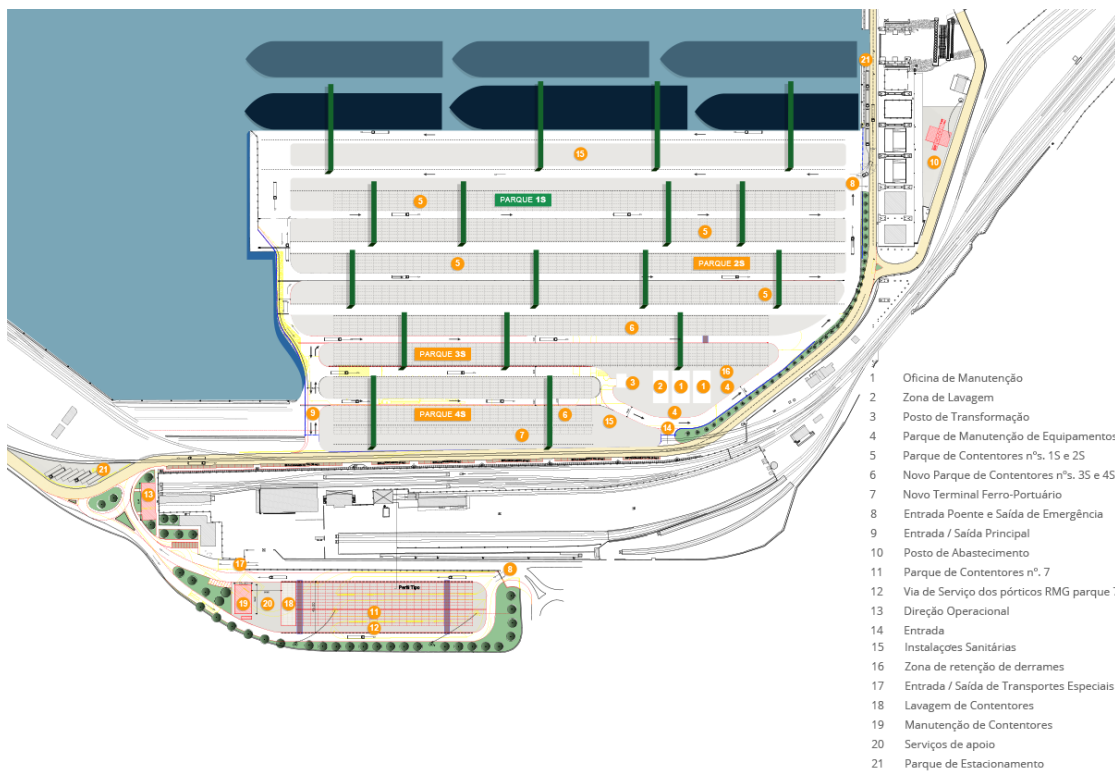


Figura 5: Layout do Terminal de Contentores Sul. Fonte: (YILPORT Leixões, 2023)

4.3. Formulação Matemática

Ao longo deste subcapítulo, é apresentado um modelo matemático para otimizar a atribuição de tarefas de manobra de contentores a navios e guias. O modelo visa minimizar o tempo total de espera dos navios no porto, levando em consideração múltiplas restrições operacionais e logísticas. As decisões de alocação de navios a berços, ordem de execução das operações, uso de guias, divisão das guias entre navios e cálculo dos tempos de manobra são cuidadosamente tratadas por meio de variáveis de decisão e restrições interligadas. Foram adotadas as seguintes suposições:

- Cada navio é apenas alocado a um berço;
- Cada berço possui um número fixo de guias;
- O número de guias a atuar em simultâneo num navio influencia o tempo de operação do mesmo;
- As guias não podem sair dos navios enquanto não terminarem as tarefas, nem entrar num navio que já começou as operações;
- Apenas duas guias podem atuar em simultâneo num navio;

Considere-se:

- N : Número de Navios
- B : Número de Berços
- U : Número de Guias

Conjuntos:

- $I = \{1, 2, \dots, N\}$
- $J = \{1, 2, \dots, B\}$
- $G = \{1, 2, \dots, U\}$

Parâmetros:

- $COut_i$: Número de contentores a descarregar do Navio i , $\forall i \in I$.
- CIn_i : Número de contentores a carregar do Navio i , $\forall i \in I$.
- $TempoPorGrua_j$: Tempo necessário, em minutos, para a manobra de um contentor no Berço j , $\forall j \in J$.
- $Chegada_i$: Data de chegada do Navio i , $\forall i \in I$.
- $Comprimento_i$: Comprimento do Navio i , $\forall i \in I$.
- $ComprimentoBerth_j$: Comprimento do Berço j , $\forall j \in J$.
- $TempoBerth_i$: Tempo médio de atracação/desatracaçã, em minutos, do Navio i , $\forall i \in I$.

Variáveis de decisão:

- $Inicio_i$: Data de início das operações do Navio i , $\forall i \in I$.
- $Saida_i$: Data de saída do Navio i , do porto, $\forall i \in I$.
- $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o Navio } i \text{ é alocado do Berço } j \\ 0, & \text{o contrário} \end{cases}$, $\forall i \in I, \forall j \in J$.
- $Ordem_{ii'j} = \begin{cases} 1, & \text{se o Navio } i \text{ é alocado depois do Navio } i', \text{ no Berço } j \\ 0, & \text{o contrário} \end{cases}$, $\forall i \in I, \forall i' \in I, \forall j \in J$.
- Y_{ij} : Número de contentores do Navio i , a manobrar, no Berço j , $\forall i \in I, \forall j \in J$.
- $Grua_{gij} = \begin{cases} 1, & \text{se a Grua } g \text{ opera o Navio } i, \text{ no Berço } j \\ 0, & \text{o contrário} \end{cases}$, $\forall g \in G, \forall i \in I, \forall j \in J$.
- NG_{gij} : Número de contentores manobrados pela Grua g , no Navio i , no Berço j , $\forall g \in G, \forall i \in I, \forall j \in J$.
- T_{ij} : Tempo de operação do Navio i , no Berço j , $\forall i \in I, \forall j \in J$.
- S_{ij} : Número de guias a atuar em simultâneo no Navio i , no Berço j , $\forall i \in I, \forall j \in J$.

Função Objetivo:

$$\min \sum_{i \in I} (Inicio_i - Chegada_i) \quad (1)$$

Subject to:

$$\sum_{j \in J} X_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (2)$$

$$Ordem_{ii'j} \leq X_{ij}, \forall i, i' \in I, \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{i' \in I} Ordem_{ii'j} = 1, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} Ordem_{iij} \leq 1, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & (Inicio_i \leq Inicio_{i'}) \wedge (Saida_i \geq Saida_{i'} \wedge Saida_i \geq Inicio_{i'}) \vee \\ & (Inicio_i \leq Inicio_{i'}) \wedge (Saida_i \leq Saida_{i'} \wedge Saida_i \geq Inicio_{i'}) \Rightarrow \end{aligned} \quad (6)$$

$$Comprimento_i + Comprimento_{i'} \leq ComprimentoBerth_j, \forall i, i' \in I, \forall j \in J$$

$$Inicio_i \geq Chegada_i + TempoBerth_i, \forall i \in I \quad (7)$$

$$Saida_i \geq Inicio_i + T_{ij} + TempoBerth_i, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (8)$$

$$Ordem_{ii'} = 1 \Rightarrow Inicio_i \geq Inicio_{i'}, \forall i, i' \in I, \forall j \in J \quad (9)$$

$$Y_{ij} = (COut_i + CIn_i) \times X_{ij}, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (10)$$

$$\sum_{g \in G} Grua_{gij} \geq 1, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (11)$$

$$\sum_{g \in G} NG_{gij} = Y_{ij}, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (12)$$

$$S_{ij} = \sum_{g \in G} Grua_{gij}, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (13)$$

$$T_{i1} = \max_{g \in G} NG_{gij} \times TempoPorGrua_j, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (14)$$

$$Inicio_i \geq 0, \forall i \in I \quad (15)$$

$$Saida_i \geq 0, \forall i \in I \quad (16)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (17)$$

$$Ordem_{ii'} \in \{0,1\}, \forall i \in I, \forall i' \in I, \forall j \in J \quad (18)$$

$$Y_{ij} \geq 0, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (19)$$

$$Grua_{gij} \in \{0,1\}, \forall g \in G, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (20)$$

$$NG_{gij} \geq 0, \forall g \in G, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (21)$$

$$T_{ij} \geq 0, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (22)$$

$$S_{ij} \geq 0, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (23)$$

O modelo matemático apresentado define um problema de otimização complexo relacionado à gestão de terminais portuários. Em seguida, será realizada uma análise detalhada de cada restrição, avaliando sua relevância em relação ao problema em questão.

A primeira restrição (1) define a função objetivo do problema que visa minimizar a soma dos tempos de espera entre a chegada e início de operações para todos os navios, refletindo a intenção de reduzir os atrasos nas operações portuárias. A restrições (2) e (3) garantem que cada navio seja alocado a um único berço, impedindo a duplicação de alocações, garantindo uma distribuição equitativa das embarcações nos berços disponíveis e uma relação de precedência entre a alocação de navios aos berços, garantindo que a ordem de chegada dos navios seja respeitada, evitando que navios mais recentes sejam alocados antes dos que chegaram antes. A restrição (4) garante que cada navio tenha apenas uma ordem de atracação e a restrição (5) limita o número de ordens do primeiro navio em cada berço. A restrição (6) garante que os comprimentos dos navios com a mesma ordem, ou seja, com operações em simultâneo, não ultrapassem o comprimento total do berço em que estão alocados. As restrições (7) e (8) controlam o tempo de início e saída das operações em relação à chegada e ao término das operações, respeitando a lógica temporal das atividades portuárias e a restrição (9) estabelece a relação entre a ordem de atracação dos navios e os seus tempos de início e saída, garantindo a ordem temporal das operações.

A restrição (10) calcula o número de contentores manobrados com base na alocação de navios aos berços, fornecendo uma métrica importante para a otimização das operações. A restrição (11) garante a disponibilidade de guias nos berços, respeitando a necessidade mínima de guias para operar navios. A restrição (12) controla o número de contentores movidos por grua em cada terminal, garantindo que as operações sejam eficientes e distribuídas pelo melhor número de guias. A restrição (13) determina o número de guias a atuar simultaneamente em navios no terminal norte e sul, impactando diretamente no tempo de operação total de cada navio. Por fim, a restrição (14) calcula o tempo total de manobra de contentores em cada terminal com base no número de contentores manobrados pelas guias e no tempo de operação das guias presentes em cada terminal.

Em resumo, este modelo matemático aborda de forma abrangente e rigorosa a gestão de operações portuárias, considerando as datas de chegada dos navios e o número e as características das guias disponíveis nos respectivos terminais, visando a minimização dos tempos de espera e a melhoria da eficiência nas operações portuárias.

4.4. Descrição e Análise de Resultados

4.4.1. Dados Utilizados

Com o intuito de realizar a validação e a aplicação prática do modelo formulado anteriormente, foi necessário o desenvolvimento de um modelo de Programação Linear Inteira Mista (MILP) com recurso ao *software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Version 22.1.1*. Esta ferramenta é conhecida pela sua eficácia na resolução de problemas de otimização complexos e é amplamente utilizada em várias áreas, incluindo a logística e gestão portuária. O modelo MILP será utilizado na avaliação e comparação de resultados reais fornecidos pelo TCL. Ao implementar o MILP, é possível simular diversos cenários hipotéticos e realizar análises detalhadas das alocações de recursos do porto, levando em consideração as restrições e condições específicas do ambiente portuário em questão. Com base nas soluções ótimas obtidas pelo modelo, será possível compará-las com dados reais do Porto de Leixões, permitindo uma avaliação precisa da eficiência das operações portuárias em relação ao tempo de espera dos navios. Esta abordagem oferece *insights* valiosos para aprimorar a gestão portuária, identificar áreas de melhoria e tomar decisões embasadas em dados concretos, contribuindo para um funcionamento mais eficaz e eficiente do porto.

Serão utilizados como dados todos os navios atracados durante o mês de janeiro do ano de 2020 no Terminal de Contentores de Leixões. Estes dados, englobam os períodos de chegada dos navios, o número de contentores a carregar e a descarregar, o comprimento dos navios, os tempos de operação e o terminal a que foram atribuídos, como é apresentado na Tabela 2. A informação dos restantes navios está presente no ANEXO A.

Tabela 2: Excerto dos Dados dos Navios - TCL

Ship No.	IN	OUT	LOA	Arrived	Start Ops	End Ops	Sailed	Terminal
1	233	28	200	01/01/2020 07:00	02/01/2020 08:24	02/01/2020 15:07	02/01/2020 17:35	Sul
2	92	128	139	01/01/2020 07:39	02/01/2020 08:34	02/01/2020 16:55	02/01/2020 18:06	Sul
3	60	205	135	01/01/2020 15:35	02/01/2020 08:26	02/01/2020 18:50	02/01/2020 22:38	Norte
4	0	171	135	01/01/2020 18:02	06/01/2020 08:45	06/01/2020 15:37	06/01/2020 18:15	Norte
...
103	780	473	211	31/01/2020 06:21	31/01/2020 08:28	01/02/2020 08:52	01/02/2020 11:27	Sul
104	59	59	210	31/01/2020 07:15	01/02/2020 01:25	01/02/2020 09:53	01/02/2020 10:42	Norte
105	130	297	200	31/01/2020 11:30	01/02/2020 14:51	01/02/2020 23:44	02/02/2020 00:55	Sul

4.4.2. Caracterização dos Parâmetros

Para estabelecer os parâmetros que fornecem valores específicos ao modelo é necessário definir a informações sobre os navios, os berços, as gruas e outros elementos relevantes para a alocação de recursos num porto. Com base no *layout* do TCL, é possível concluir que este é composto por 2 terminais, o Terminal Norte (TN) com um comprimento de 360 metros e o Terminal Sul (TS) com um comprimento de 540 metros. Em relação aos equipamentos, o TN está equipado com 2 guindaste de cais e o TS com 4. Segundo Daniel Catalão (2014), no programa “Sabia Que?”, cada grua no Terminal Sul é capaz de movimentar em média 30 contentores por hora, o que origina um tempo de 2 minutos por contentor. Assim, o tempo médio que um operador de guindaste precisa para manobrar um contentor no TS é de 2 minutos. Em contrapartida, no TN, esse período é estendido para 2,5 minutos, devido à presença de guindastes mais antigos neste terminal, resultando em tempos de manobra mais longos. Cabe mencionar que, além da antiguidade dos guindastes, outros fatores, como as condições climáticas, a disponibilidade de pessoal, a manutenção e eventuais avarias, podem influenciar significativamente os tempos de operação das gruas em ambos os terminais.

Por fim, como o tempo de atracagem é específico a cada navio e depende de diversos fatores como o tamanho da embarcação, o tipo de carga a transportar e as condições climáticas, seria de extrema dificuldade calcular precisamente este tempo para cada navio. Desta forma, recorreu-se aos dados fornecidos pelo TCL e foi calculado um tempo médio de atracação igual para todos os navios, utilizando a média destes valores, como é possível ver no Gráfico 1.

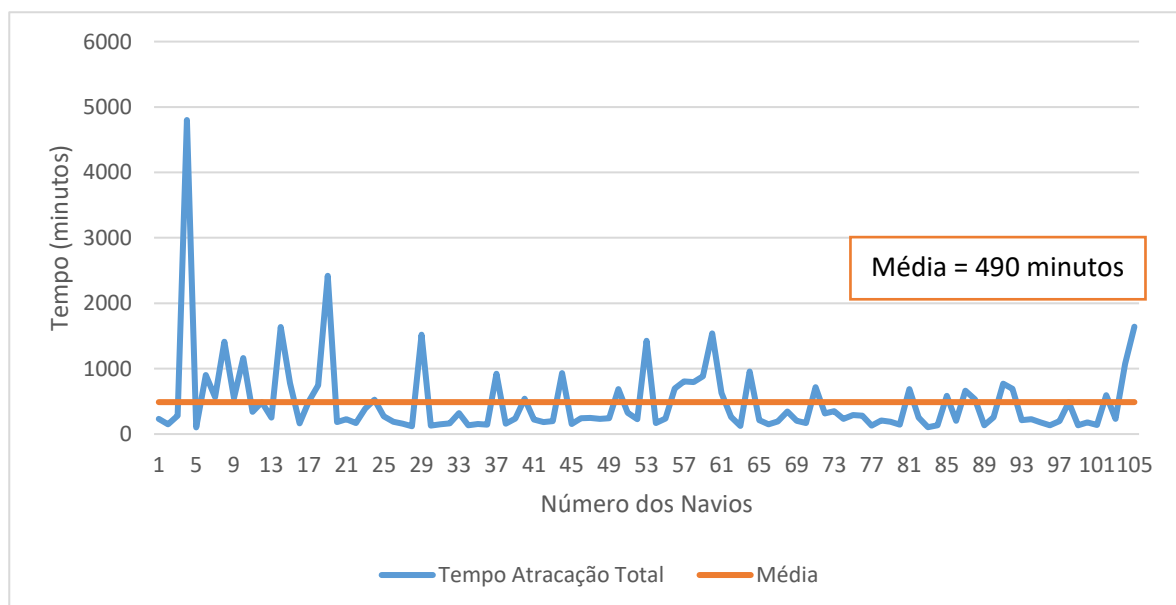


Gráfico 1: Tempo Médio de Atracação

Através da análise do Gráfico 1, é possível observar a presença de valores muito dispersos que podem distorcer as conclusões finais. Neste caso, a existência de valores mais elevados, causados normalmente por eventos incomuns, originam um tempo médio de atracação maior. Como resultado, os navios números 4, 8, 14, 19, 29, 53, 60 e 105 serão retirados e uma nova média será calculada, como é ilustrado no Gráfico 2.

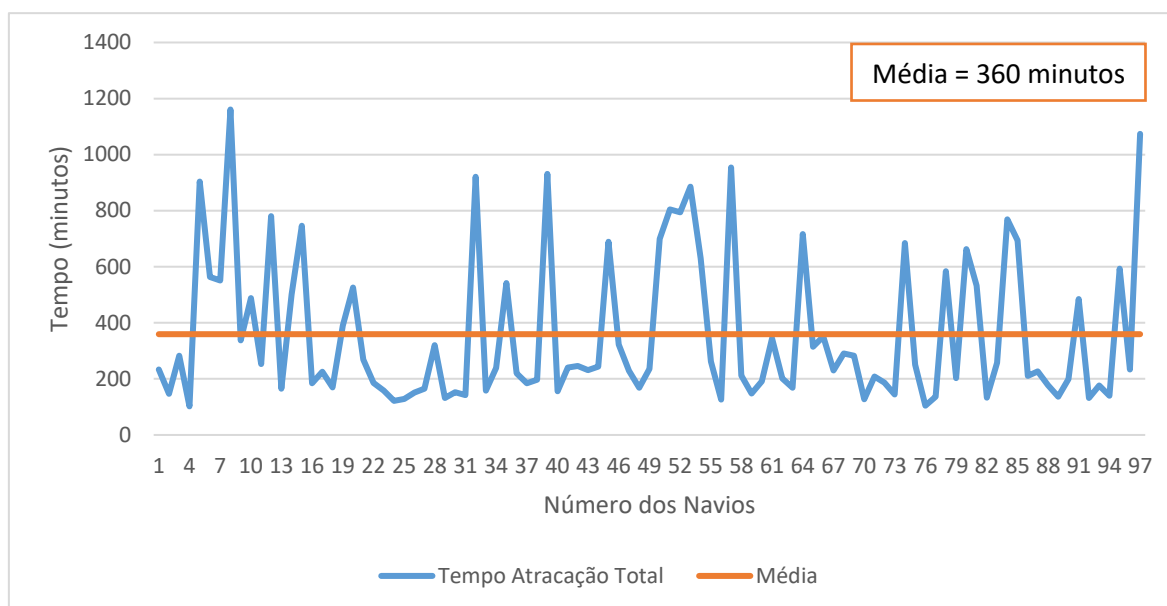


Gráfico 2: Tempo Médio de Atracação Final

Este processo de filtragem de dados permite obter uma visão mais representativa do Tempo Médio de Atracação, eliminando fenômenos atípicos e destacando tendências mais consistentes. Desta forma, o valor do Tempo Médio de Atracação foi ajustado para 360 minutos, o equivalente a 6 horas, o que representa um valor frequentemente mais observado. De notar que este valor engloba a atracação e a desatracação do navio, que corresponde ao tempo desde a entrada do navio no porto até à ancoragem no cais em que foi alocado e ao tempo desde a desancoragem até à saída do navio do porto, respetivamente.

No ANEXO C encontram-se todos os valores utilizados para o cálculo do Tempo Médio de Atracação.

Em síntese, na Tabela 3 encontram-se todos os parâmetros previamente mencionados, que serão utilizados no modelo MILP, para que seja possível a obtenção de resultados com base na realidade do Porto de Leixões.

Tabela 3: Parâmetros TCL

Parâmetros TCL	
Número de Cais	2
Comprimento Cais Norte (metros)	360
Comprimento Cais Sul (metros)	540
Número de Gruas Norte	2
Número de Gruas Sul	4
Tempo por Contentor Norte (minutos/contentor)	2,5
Tempo por Contentor Sul (minutos/contentor)	2
Tempo Médio de Atracação e Desatracação (minutos)	360

4.4.3. Resultados Computacionais

Com base nos parâmetros e restrições definidos, o CPLEX é agora capaz de realizar os cálculos necessários para determinar a solução ideal, que minimize o tempo de espera dos navios no Porto de Leixões. Todas as instâncias são resolvidas num computador pessoal com um Intel Core i7 - 8550U com 8GB de memória RAM e os resultados obtidos são posteriormente transcritos para o mesmo ficheiro EXCEL descrito anteriormente, onde se torna mais fácil a compreensão e análise dos mesmos.

Na Tabela 4, são apresentados os resultados, correspondentes aos primeiros 10 navios a atribuir no TCL, onde é possível ver o cais em que foram alocados e o número de contentores manobrados pelas gruas que lhes foram associados. Por exemplo, o navio identificado pelo número 1 foi alocado no terminal Sul e as gruas que lhe foram atribuídas foram as gruas número 3 e número 4, que manobraram um total de 130 e 131 contentores, cada uma, respetivamente.

Tabela 4: Resultados dos terminais e das gruas obtidos para os 10 primeiros Navios

Ship No.	Terminal		Gruas Norte		Gruas Sul			
	REAL	CPLEX	1	2	1	2	3	4
1	Sul	Sul	-	-	-	-	130	131
2	Sul	Norte	110	110	-	-	-	-
3	Norte	Sul	-	-	133	132	-	-
4	Norte	Norte	171	-	-	-	-	-
5	Norte	Sul	-	-	-	-	80	81
6	Sul	Sul	-	-	-	-	130	129
7	Norte	Norte	79	79	-	-	-	-
8	Sul	Sul	-	-	186	185	-	-
9	Sul	Norte	176	-	-	-	-	-
10	Norte	Sul	-	-	-	-	273	273

Na Tabela 5, são apresentados os resultados referentes aos tempos de início e fim de operações, os tempos de espera e a data em o navio zarpuo do TCL, tanto no contexto real como na simulação do CPLEX.

Tabela 5: Resultados das datas obtidos para os 10 primeiros Navios

Ship No.	Arrived	Start Ops		Waiting Time (horas)		End Ops		Sailed		Operation Time (minutos)	
		REAL	CPLEX	REAL	CPLEX	REAL	CPLEX	REAL	CPLEX	REAL	CPLEX
1	01/01/2020 07:00	02/01/2020 08:24	01/01/2020 10:00	25,4	3	02/01/2020 15:07	01/01/2020 14:22	02/01/2020 17:35	01/01/2020 18:35	403	262
2	01/01/2020 07:39	02/01/2020 08:34	01/01/2020 10:39	24,9	3	02/01/2020 16:55	01/01/2020 15:14	02/01/2020 18:06	01/01/2020 18:14	501	275
3	01/01/2020 15:35	02/01/2020 08:26	01/01/2020 18:35	16,9	3	02/01/2020 18:50	01/01/2020 23:01	02/01/2020 22:38	02/01/2020 02:01	624	266
4	01/01/2020 18:02	06/01/2020 08:45	01/01/2020 21:02	110,7	3	06/01/2020 15:37	02/01/2020 04:09	06/01/2020 18:15	02/01/2020 07:09	412	427,5
5	01/01/2020 22:15	02/01/2020 08:27	02/01/2020 02:01	10,2	3,8	02/01/2020 15:33	02/01/2020 04:43	02/01/2020 16:15	02/01/2020 07:43	426	162
6	02/01/2020 04:50	02/01/2020 22:50	02/01/2020 07:50	18	3	03/01/2020 10:41	02/01/2020 12:10	03/01/2020 11:40	02/01/2020 15:10	711	260
7	02/01/2020 10:15	02/01/2020 19:03	02/01/2020 13:15	8,8	3	03/01/2020 11:22	02/01/2020 16:32	03/01/2020 12:10	02/01/2020 19:32	979	197,5
8	02/01/2020 11:20	03/01/2020 08:40	02/01/2020 15:10	21,3	3,8	03/01/2020 19:49	02/01/2020 21:22	03/01/2020 22:46	03/01/2020 00:22	669	372
9	02/01/2020 14:55	02/01/2020 19:40	02/01/2020 19:32	4,7	4,6	03/01/2020 02:12	03/01/2020 02:52	03/01/2020 06:48	03/01/2020 05:52	392	440
10	02/01/2020 19:16	03/01/2020 13:40	03/01/2020 00:22	18,4	5,1	04/01/2020 16:03	03/01/2020 09:28	04/01/2020 17:25	03/01/2020 12:28	1583	546

Como é possível concluir acerca da instância apresentada anteriormente, o modelo demonstrou melhorias significativas em relação ao cenário real. Estas melhorias não se traduziram apenas em reduções substanciais nos tempos de espera dos navios, mas também na eficiência operacional notavelmente aprimorada. No entanto, ao expandir esta análise para todos os navios que atracaram no TCL no mês de janeiro de 2020, contabilizando um total de 105 navios, torna-se possível verificar se esses resultados são consistentes num conjunto mais amplo de cenários e se o CPLEX é capaz de manter ou melhorar estes ganhos de eficiência num ambiente mais aproximado à realidade. É importante destacar também, que esta análise permitirá entender melhor como as operações portuárias podem ser otimizadas em termos de alocação de recursos, tempo de espera e eficiência operacional, considerando uma amostra mais representativa e diversificada de navios. Isso é crucial para determinar a viabilidade e a aplicação prática do modelo CPLEX em situações do mundo real, onde a complexidade e a dinâmica operacional são inevitáveis.

Através de todos os resultados detalhadamente expostos no ANEXO C, podemos construir o Gráfico 4 e o Gráfico 3, com a informação referente ao Tempo de Espera e ao Tempo de Operação dos navios alocados, respetivamente.

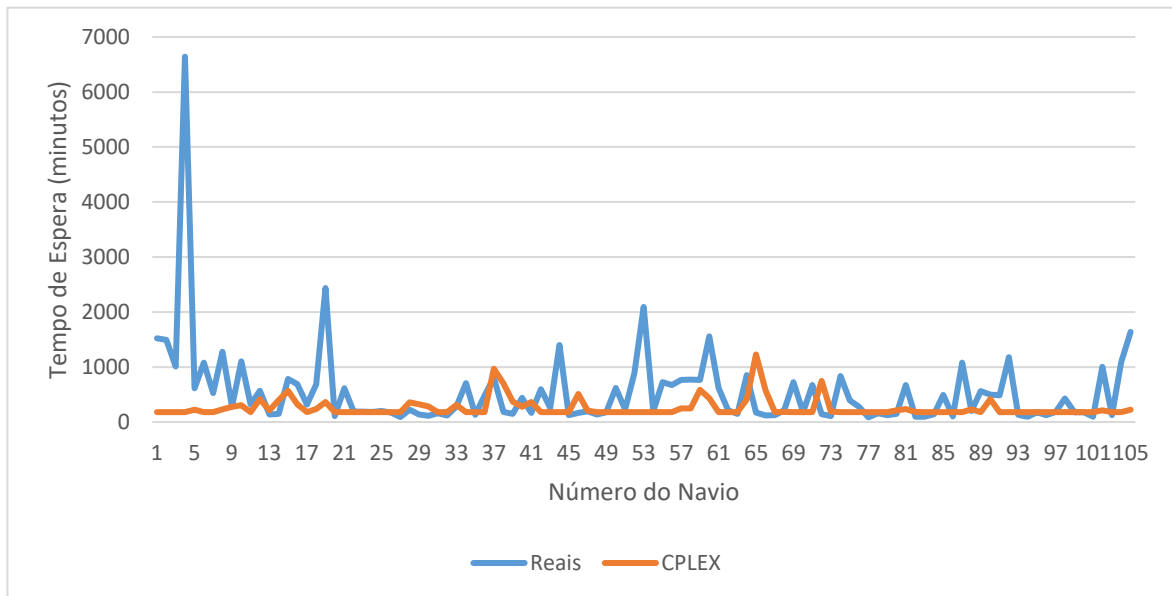


Gráfico 4: Comparação dos Tempos de Espera

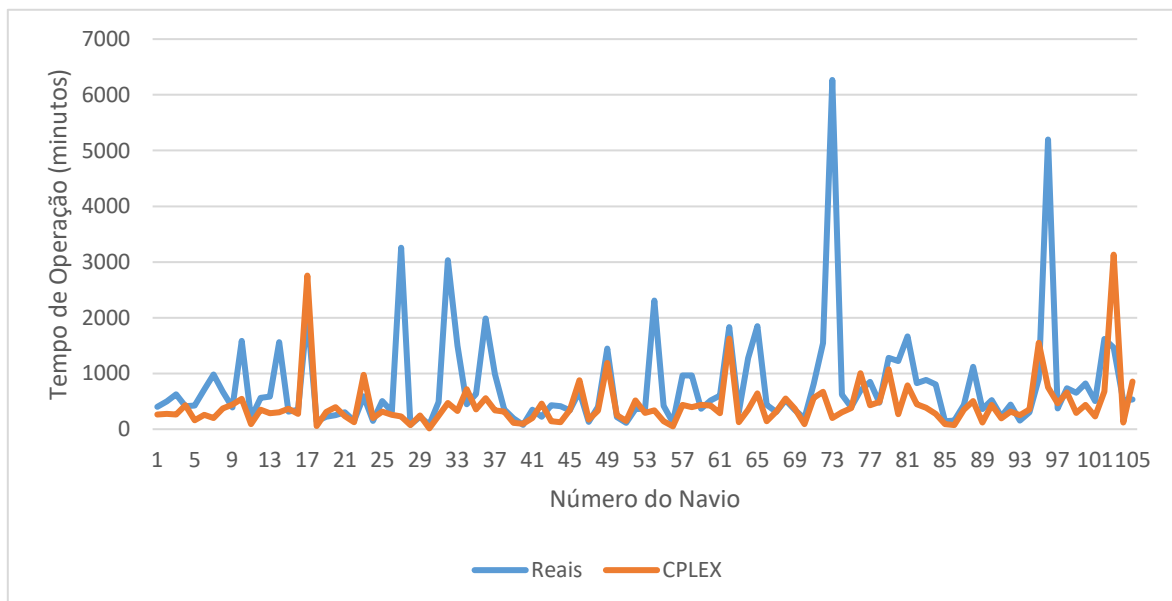


Gráfico 3: Comparação dos Tempos de Operação

Numa primeira análise é possível observar a presença de valores muito elevados que podem distorcer as conclusões finais. Esses valores anómalos podem ser resultado de eventos como as avarias ou as manutenções das gruas, a ocorrência de acidentes, ou até mesmo erros de registo nos dados coletados. Deste modo serão retirados da análise dos Tempos de Espera o navio número 4 e da análise do Tempo de Operação os navios números 73 e 96.

Assim, é possível chegar aos resultados apresentados no Gráfico 5 e no Gráfico 6.

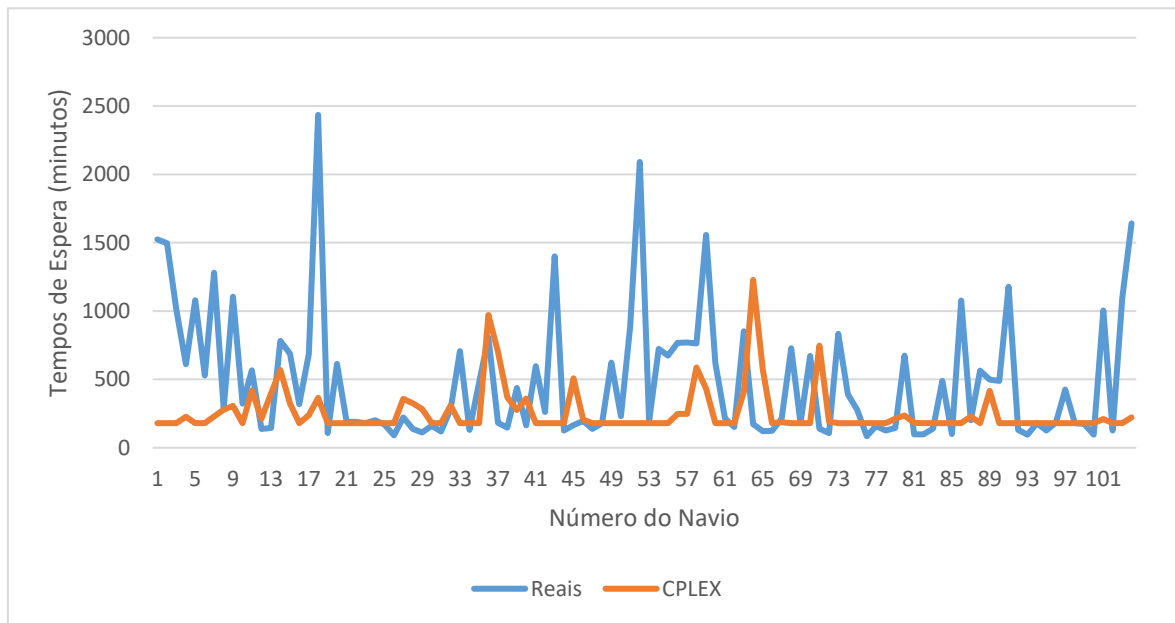


Gráfico 5: Comparação dos Tempos de Espera Finais

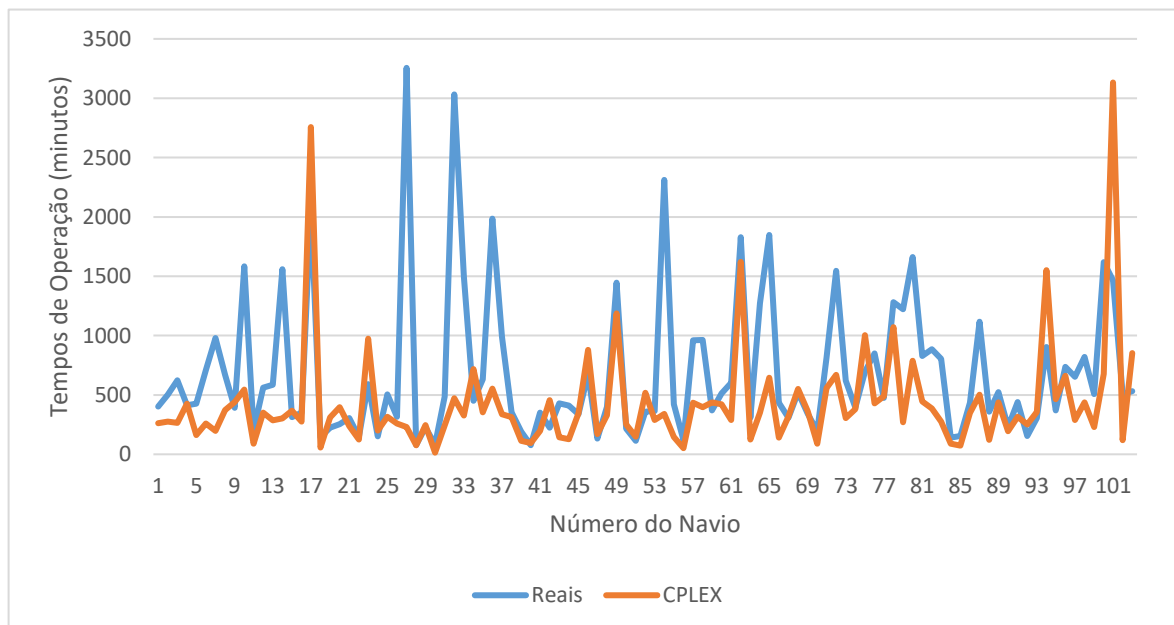


Gráfico 6: Comparação dos Tempos de Operação Finais

Com a análise dos gráficos, é possível ver que o modelo matemático desenvolvido apresentou melhorias significativas em relação ao cenário real, evidenciando de forma clara como a implementação do CPLEX impactou positivamente os Tempos de Espera e de Operação dos navios no Porto de Leixões. Os gráficos revelam tendências que indicam reduções consistentes nos tempos de espera ao longo do período de análise, o que reforça a eficácia do modelo em otimizar as operações portuárias. Estas representações visuais fornecem uma compreensão mais acessível e intuitiva dos resultados, complementando as análises quantitativas realizadas. No Gráfico 7, é possível visualizar de forma clara as melhorias resultantes do modelo desenvolvido dos Tempos de Espera Médios e dos Tempos de Operação Médios de cada navio.

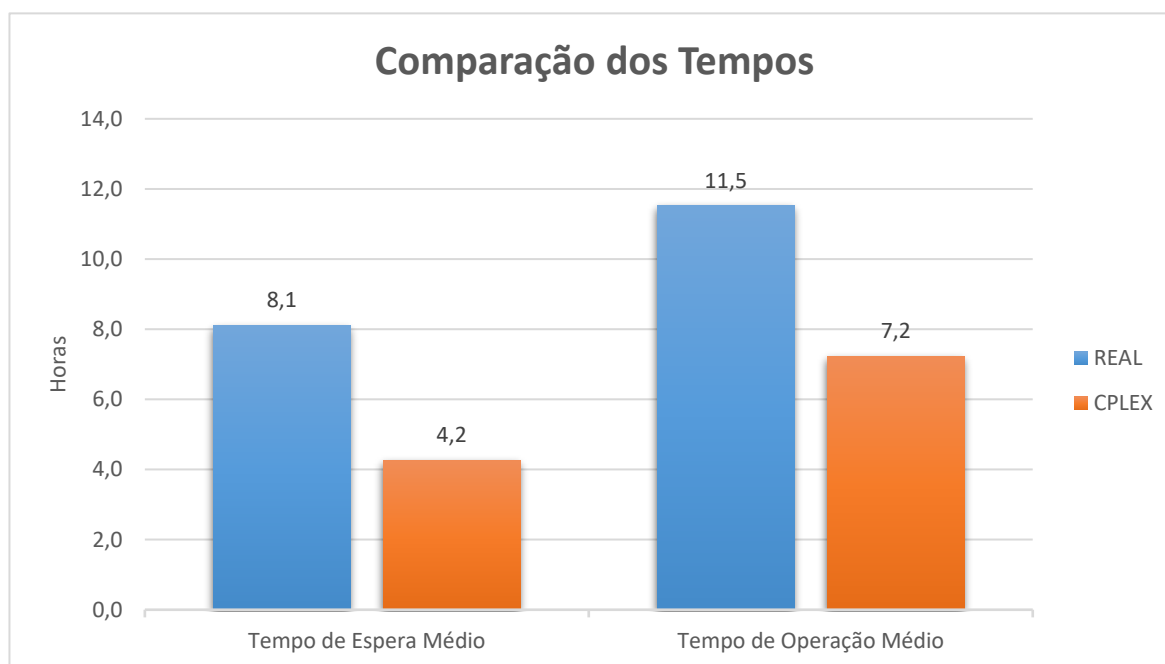


Gráfico 7: Comparação dos tempos reais e obtidos pelo CPLEX

Desta forma, os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo de otimização MILP no contexto do nosso caso de estudo são altamente encorajadores. A análise dos dados revelou uma redução significativa no Tempo Médio de Espera dos navios no Porto de Leixões, passando de 8,1 horas para 4,2 horas. Estes valores representam uma notável melhoria de 47,56%, indicando uma alocação mais eficiente de recursos e uma redução substancial nos períodos de inatividade. Além disso, os Tempos Médios de Operações também apresentaram uma notável diminuição, indo de 11,5 horas para 7,2 horas, o que corresponde a uma melhoria de 37,39%.

Nesta dissertação, foi conduzida uma análise cuidadosa de instâncias reais, diferenciando-a da abordagem comum de utilizar instâncias geradas aleatoriamente, como documentado, por exemplo, nos artigos de Han et al. (2010) e de Zhen (2015), onde são utilizadas distribuições para gerar conjuntos de navios. O tipo de abordagem adotada nesta dissertação permite obter soluções mais relevantes e aplicáveis à realidade em questão, servindo de comparação e possibilitando uma avaliação mais precisa das implicações práticas dos resultados obtidos e promove a tomada de decisão.

Contudo, os resultados obtidos em instâncias simuladas em condições ideais, onde não são considerados atrasos. Apesar da inegável melhoria do uso deste modelo de otimização matemática no contexto da indústria portuária, imprevistos como falhas nos guindastes, disponibilidade dos operadores e fatores meteorológicos, não são tidos em conta na simulação. Tais fatores têm o potencial de exercer um impacto substancial no desempenho do modelo desenvolvido, como é discutido nos artigos de Rodrigues e Agra, (2021) e de Ursavas e Zhu (2016). Portanto, é fundamental reconhecer que estes resultados fornecem uma visão geral do seu desempenho em condições ideais e que a adaptação a esses imprevistos é uma consideração crucial na implementação prática destas soluções.

Ao longo deste estudo, foi despendido um tempo médio de 25 minutos para analisar cada conjunto de 10 navios otimizados. Comparando com os resultados obtidos em artigos como, Diabat e Theodorou (2014) e Kaveshgar et al. (2012), onde são desenvolvidos GA, estes frequentemente alcançam um desempenho superior, completando todas as tarefas num período de tempo menor.

Em resumo, os resultados obtidos fornecem uma visão exemplificativa da eficiência do CPLEX na otimização do tempo de espera dos navios no Porto de Leixões. A alocação de terminais e guas demonstrou melhorias significativas em relação ao cenário real, destacando a capacidade do CPLEX em encontrar soluções que minimizem atrasos e melhorem a eficiência operacional. Além disso, os tempos de espera e as datas de saída dos navios foram consideravelmente otimizados, demonstrando a utilidade da abordagem da otimização. É importante realçar que, embora, o CPLEX tenha demonstrado a sua eficácia na otimização dos tempos de espera e operações no Porto de Leixões nesta amostra, o mesmo opera em um ambiente controlado e idealizado. Este modelo não considera muitos dos desafios e imprevistos que podem ocorrer no contexto real da operação portuária, fatores como avarias de guas, problemas técnicos nos navios, disponibilidade de recursos humanos e níveis de experiência dos operadores, variações nas condições das marés e influências meteorológicas podem afetar significativamente o desempenho operacional num cenário prático. Outras limitações dos resultados envolvem o uso do tempo médio de atracação de cada navio e a consideração que todos os recursos se encontram disponíveis.

4.5. Impacto no Ambiente

No contexto da indústria marítima, a busca pela melhoria operacional e a redução do impacto ambiental têm se tornado prioridades cruciais. Neste subcapítulo, é realizada uma análise profunda da ligação entre o consumo de combustível, as emissões de gases poluentes e a eficiência operacional dos navios. A compreensão desta relação é essencial para minimizar o impacto ambiental e otimizar a utilização de recursos.

Após os resultados obtidos das melhorias dos Tempos de Espera e de Operação, é evidente que as práticas de otimização desempenham um papel importantíssimo na redução do impacto ambiental da indústria marítima podendo originar significativas reduções no consumo de combustível e nas emissões de gases poluentes tanto durante a navegação quanto enquanto estão atracados nos portos. Estas reduções desempenham um papel fundamental na mitigação de vários fatores ambientais prejudiciais, não beneficiando apenas as operações portuárias em termos de eficiência, mas contribuindo também significativamente para a preservação do meio ambiente envolvente.

As otimizações destes processos estão diretamente interligadas com os seguintes fatores ambientais:

- **Emissões de Gases de Efeito Estufa:** A diminuição dos Tempos de Espera e de Operação resulta numa redução direta nas emissões de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x). Menos tempo de funcionamento dos motores e sistemas de energia das embarcações equivale a menos combustível queimado e, portanto, menos emissões de gases de efeito estufa.
- **Poluição do Ar:** Reduzir os Tempos de Espera e de Operação diminui a quantidade de poluentes lançados na atmosfera, o que melhora a qualidade do ar nas áreas portuárias e nas proximidades, beneficiando não apenas os trabalhadores do porto, mas também as comunidades locais;
- **Qualidade da Água:** Operações portuárias com alguma frequência e prolongadas podem levar ao despejo de águas residuais e produtos químicos no mar. A redução do tempo de permanência das embarcações nos portos contribui para a preservação da qualidade da água, evitando a contaminação;
- **Impacto nos Ecossistemas Marinhos:** Reduzir o tempo que os navios passam atracados pode minimizar a perturbação dos ecossistemas marinhos próximos aos portos. Isso é especialmente importante em áreas sensíveis, como estuários e recifes de corais;
- **Ruído e Perturbação Sonora:** Navios em operação e atividades portuárias podem ser fontes significativas de ruído. A diminuição dos Tempos de Espera e de Operação reduz o período em que os motores e as maquinarias pesadas estão em funcionamento, resultando em menos poluição sonora nas áreas circundantes, o que é benéfico para a vida marinha e para os habitantes locais;
- **Consumo de Recursos Naturais:** Uma operação portuária mais eficiente requer menos recursos, como combustíveis e água. A conservação desses recursos naturais é crucial para a sustentabilidade a longo prazo.

Desta forma, é possível concluir que a diminuição dos períodos de espera e de operação contribui para a sustentabilidade no setor de transporte marítimo. Esta abordagem não responde apenas às preocupações ambientais, mas também promove a conformidade com regulamentos e padrões ambientais cada vez mais rigorosos.

A precisão no cálculo das emissões de navios representa um grande desafio devido à complexidade das variáveis envolvidas neste contexto, contudo, Hu et al. (2014) descreve a Equação (24), que pode ser usada para calcular as emissões das embarcações enquanto estão atracadas nos portos, ou em espera.

$$ME_i = \sum_n PO_i \times AC_i \times LF_i \times EF_{i,n} \times FCF_n \times EN_i \quad (24)$$

onde:

- ME_i é o total de emissões do navio i enquanto está atracado.
- PO_i é a potência nominal do motor do navio i .
- AC_i é o tempo médio de atividade de cada motor auxiliar do navio i .
- LF é a taxa de carga (relação entre a potência média usada durante operações normais e a potência máxima nominal).
- $EF_{i,n}$ é o fator de emissão do poluente n para o navio i .
- FCF_i é o fator de correção do combustível para o poluente n .
- EN_i é o número de motores do navio i .

A equação apresentada permite calcular as emissões de gases poluentes como é o caso do dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x), enquanto o navio está atracado com base no tempo de espera. A Tabela 6, apresenta os valores de referência dos fatores de emissão que serão utilizados.

Tabela 6: Valores de Referência dos Fatores de Emissão. Adaptado de: (Hu et al., 2014)

Fator de Emissão	CO ₂	NO _x	SO _x
Emissões (g/kWh)	683	13	12,3
Fatores de Correção	1	0,948	0,04

Para calcular os valores das emissões será parametrizado um navio fictício, i , baseado nas características mais comuns dos navios, uma vez que, a diversidade de navios existentes aumenta a dificuldade para criar instâncias de comparação fidedignas. Assim, a Potência Nominal do Motor (PO) foi definida com um valor médio de 250 cavalos-vapor (hp) que é um fator crítico que reflete a diversidade das classes de navios e dos seus motores. A Relação de Carga Média do Motor LF , foi definida em 0,5, representando a carga média sob a qual os motores operam durante as atividades, onde o motor do navio opera a metade de sua capacidade máxima durante as operações. O Número de Motores (EN) foi estabelecido em 4 como uma média, oferecendo uma visão abrangente, considerando uma vasta variedade de tipos de navios. Será também utilizada a soma do Tempo de Espera e do Tempo de Operação para definir o Tempo Médio de Atividade (AC), contabilizando um total de 19,6 horas para os valores médios reais e 11,4 horas para os valores médios obtidos na solução do CPLEX.

A combinação destes parâmetros torna-se fundamental para estimar com precisão as emissões de poluentes durante as operações portuárias, tendo em conta os resultados de Tempos de Espera e de Operação calculados anteriormente, e perceber o verdadeiro impacto da melhoria destes tempos na sustentabilidade de um porto.

$$ME_{iREAL} = 250 \times 0,746 \times (8,1 + 11,5) \times 0,5 \times ((683 \times 1) + (13 \times 0,948) + (12,3 \times 0,04)) \times 4 = 5086971,61 \text{ g} = 5,09 \text{ toneladas} \quad (25)$$

$$ME_{iCPLEX} = 250 \times 0,746 \times (4,2 + 7,2) \times 0,5 \times ((683 \times 1) + (13 \times 0,948) + (12,3 \times 0,04)) \times 4 = 2958748,80 \text{ g} = 2,96 \text{ toneladas} \quad (26)$$

Pela comparação dos resultados em (25) e em (26) é notável a diferença entre as emissões médias de cada navio em contexto real e na solução obtida pelo CPLEX. Em média, um navio tipo, durante todas as suas operações emite um total de 5,09 toneladas de gases de efeito de estufa para a atmosfera. Valor este que é substancialmente mais baixo, 2,96 toneladas, no caso da solução gerada pelo CPLEX com recurso ao modelo MILP desenvolvido. Isto significa que, com a otimização das operações e a consequente diminuição dos tempos de espera dos navios no porto, é possível evitar a emissão, neste caso, de 2,13 toneladas por navio de gases prejudiciais para o ambiente, uma redução de 41,85%.

Esta diferença enfatiza a complexidade em estimar com precisão as emissões de gases poluentes em ambientes portuários e a necessidade de abordagens sustentáveis. Além disso, destaca a importância de considerar variáveis que afetam diretamente as emissões, como a coordenação das operações portuárias e o tempo de espera dos navios. Estes fatores desempenham um papel significativo na redução nas emissões causadoras de impacto ambiental.

Para concluir, é evidente que a busca pela sustentabilidade na indústria marítima é fundamental para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e para promover práticas operacionais mais eficientes e responsáveis. A implementação de estratégias de otimização, como as propostas neste estudo, não só resulta em benefícios ambientais significativos, mas também contribui para a economia de recursos e a promoção de um futuro mais sustentável para a indústria de transporte marítimo.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Num cenário global, com a crescente consciencialização ambiental e regulamentações mais rigorosas, a busca por práticas sustentáveis é imperativa. Este estudo demonstra a relação existente entre as emissões de gases poluentes com os tempos de espera e de operação dos navios, enquanto estes estão atracados nos portos marítimos. Torna-se, assim, crucial que a indústria marítima continue a investir em estratégias de otimização e colaboração para promover um futuro mais sustentável e ecologicamente consciente.

Esta dissertação oferece uma análise crítica e eficaz dos desafios de otimização relacionados às operações nos portos marítimos, investigando e detalhando esses problemas, incluindo variáveis, objetivos e restrições, bem como os métodos utilizados para sua resolução. Esta análise desempenha um papel fundamental na compreensão dos desafios enfrentados na operação de portos marítimos, permitindo, assim, o desenvolvimento e validação de modelos matemáticos para apoiar decisões em terminais de contentores em portos marítimos.

Neste contexto, foram analisados uma vasta variedade de modelos matemáticos e heurísticas, avaliados sistemas de apoio à tomada de decisão para operações em terminais de contentores em portos marítimos e desenvolvido um modelo de otimização baseado em MILP para resolver o problema. O modelo foi validado utilizando dados reais provenientes do Porto de Leixões, o que permitiu demonstrar como a otimização dos processos portuários pode resultar em reduções significativas das emissões de poluentes, contribuindo assim para a promoção de práticas mais sustentáveis no setor marítimo.

Os resultados obtidos com a implementação do modelo de otimização MILP no contexto do estudo de caso são extremamente promissores para as instâncias resolvidas. Existe uma considerável diminuição no Tempo Médio de Espera dos navios no Porto de Leixões, reduzido de 8,1 horas para 4,2 horas, representando uma melhoria de 47,56%. Os Tempos Médios de Operações também provaram uma redução significativa, passando de 11,5 horas para 7,2 horas, indicando uma melhoria de 37,39%. Estas evidências apontam para uma alocação de recursos mais eficaz e uma substancial redução nos períodos de inatividade.

A comparação entre os resultados obtidos em contextos reais e na solução derivada do modelo MILP desenvolvido revelam uma diferença notável. Em média, a emissão de gases de efeito estufa por navio durante suas operações é de 5,09 toneladas. No entanto, a aplicação do modelo MILP em conjunto com o CPLEX originou uma redução significativa dessa emissão, diminuindo para 2,96 toneladas por navio, representando uma redução de 41,85%. Este contraste sublinha a importância das estratégias de otimização na mitigação das emissões prejudiciais ao ambiente, ressaltando a complexidade envolvida na estimativa precisa dessas emissões em ambientes portuários.

Todavia, é importante notar que este modelo não leva em consideração uma série de desafios e circunstâncias imprevisíveis que podem surgir durante a operação portuária real. Elementos como falhas em guindastes, problemas técnicos em navios, disponibilidade de mão de obra e níveis de experiência dos operadores, flutuações nas marés e fatores meteorológicos têm potencial para exercer um impacto substancial sobre o desempenho operacional em situações práticas.

Para concluir, a procura pela sustentabilidade na indústria marítima é crucial, não apenas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, mas também para promover práticas operacionais mais eficientes e responsáveis. A implementação de estratégias de otimização, como as propostas neste estudo, não só resulta em benefícios ambientais significativos, mas também contribui para a economia de recursos e a promoção de um futuro mais sustentável para a indústria de transporte marítimo. Estes resultados reforçam a ideia de que a indústria marítima pode alcançar um equilíbrio entre eficiência operacional e responsabilidade ambiental.

Diante dessas considerações, diversas opções para trabalhos futuros emergem, tais como:

- **Aprimoramento do Modelo:** Investigações adicionais podem se concentrar no aperfeiçoamento do modelo de otimização MILP, incorporando variáveis e parâmetros que considerem fatores de imprevisibilidade e variáveis externas que afetam as operações portuárias.
- **Integração de Inteligência Artificial:** A incorporação de técnicas de inteligência artificial pode permitir a adaptação dinâmica do modelo às condições em tempo real, melhorando a capacidade de lidar com imprevistos e otimizar continuamente as operações.
- **Análise do Impacto Económico:** Além das reduções de emissões, é relevante realizar uma análise mais abrangente do impacto económico da otimização das operações portuárias, considerando custos operacionais, economias de recursos e potenciais ganhos financeiros.
- **Avaliação da Sustentabilidade Global:** Ampliar a análise para avaliar o impacto ambiental e a eficiência operacional em toda a cadeia de abastecimento, incluindo transporte terrestre e atividades de armazenamento.
- **Desenvolvimento de Políticas:** Desenvolver políticas e diretrizes que incentivem a implementação de estratégias de otimização em portos marítimos em conformidade com objetivos ambientais e económicos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arbia, H., & Sami, H. (2019). The evolution of containerization and its impact on the Maghreb ports. *Annals of Marine Science*, 001–005. <https://doi.org/10.17352/ams.000012>
- Abou Kasm, O., & Diabat, A. (2019). The quay crane scheduling problem with non-crossing and safety clearance constraints: An exact solution approach. *Computers and Operations Research*, 107, 189–199. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.03.014>
- Abou Kasm, O., Diabat, A., & Cheng, T. C. E. (2020). The integrated berth allocation, quay crane assignment and scheduling problem: mathematical formulations and a case study. *Annals of Operations Research*, 291(1–2), 435–461. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-3125-3>
- Agra, A., & Oliveira, M. (2018). MIP approaches for the integrated berth allocation and quay crane assignment and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 264(1), 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.05.040>
- Al-Dhaheri, N., & Diabat, A. (2015). The Quay Crane Scheduling Problem. *Journal of Manufacturing Systems*, 36, 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.02.010>
- Al-Dhaheri, N., Jebali, A., & Diabat, A. (2016). The quay crane scheduling problem with nonzero crane repositioning time and vessel stability constraints. *Computers and Industrial Engineering*, 94, 230–244. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.01.011>
- APDL. (2023). Porto de Leixões. https://www.apdl.pt/galeria-de-imagens-porto?p_p_id=31_INSTANCE_qMy2msWrXzUY&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&_31_INSTANCE_qMy2msWrXzUY_redirect=https%3A%2F%2Fwww.apdl.pt%2Fgaleria-de-imagens-porto%3Fp_p_id%3D31_INSTANCE_qMy2msWrXzUY%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D2&_31_INSTANCE_qMy2msWrXzUY_struts_action=%2Fimage_gallery_display%2Fview&_31_INSTANCE_qMy2msWrXzUY_folderId=33530
- Barros, V. H., Costa, T. S., Oliveira, A. C. M., & Lorena, L. A. N. (2011). Model and heuristic for berth allocation in tidal bulk ports with stock level constraints. *Computers and Industrial Engineering*, 60(4), 606–613. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.12.018>
- Bierwirth, C., & Meisel, F. (2010). A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal of Operational Research*, 202(3), 615–627. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.031>
- Bierwirth, C., & Meisel, F. (2015). A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. In *European Journal of Operational Research* (Vol. 244, Issue 3, pp. 675–689). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.030>
- Carlo, H. J., Vis, I. F. A., & Roodbergen, K. J. (2015). Seaside operations in container terminals: literature overview, trends, and research directions. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 27(2–3), 224–262. <https://doi.org/10.1007/s10696-013-9178-3>

- Chang, D., Jiang, Z., Yan, W., & He, J. (2010). Integrating berth allocation and quay crane assignments. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(6), 975–990. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2010.05.008>
- Chen, J. H., Lee, D. H., & Cao, J. X. (2012). A combinatorial benders' cuts algorithm for the quayside operation problem at container terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(1), 266–275. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.06.004>
- Chen, J. H., Lee, D. H., & Goh, M. (2014). An effective mathematical formulation for the unidirectional cluster-based quay crane scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 232(1), 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.06.051>
- Daganzo, C. F. Z. (1989). THE CRANE SCHEDULING PROBLEM. In *Transp~r. Rn .ff*.
- Daniel Catalão. (2014). *Sabia Que? Contentores: como se organizam num porto? RTP3*.
- Diabat, A., & Theodorou, E. (2014). An Integrated Quay Crane Assignment and Scheduling Problem. *Computers and Industrial Engineering*, 73(1), 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.12.012>
- European Environmental Agency, & European Maritime Safety Agency. (2021). *European Maritime Transport Environmental Report 2021*. <https://doi.org/10.2800/3525>
- Golias, M. M., Saharidis, G. K., Boile, M., Theofanis, S., & Ierapetritou, M. G. (2009). The berth allocation problem: Optimizing vessel arrival time. *Maritime Economics and Logistics*, 11(4), 358–377. <https://doi.org/10.1057/mel.2009.12>
- Han, X. Le, Lu, Z. Q., & Xi, L. F. (2010). A proactive approach for simultaneous berth and quay crane scheduling problem with stochastic arrival and handling time. *European Journal of Operational Research*, 207(3), 1327–1340. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.07.018>
- Hu, Q. M., Hu, Z. H., & Du, Y. (2014). Berth and quay-crane allocation problem considering fuel consumption and emissions from vessels. *Computers and Industrial Engineering*, 70(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.01.003>
- Imai, A., Chen, H. C., Nishimura, E., & Papadimitriou, S. (2008). The simultaneous berth and quay crane allocation problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(5), 900–920. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2007.03.003>
- Instituto Nacional de Estatística. (2021). *Estatísticas dos Transportes e Comunicações - 2021*.
- Iris, Ç., Pacino, D., Ropke, S., & Larsen, A. (2015). Integrated Berth Allocation and Quay Crane Assignment Problem: Set partitioning models and computational results. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 81, 75–97. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.06.008>
- Karam, A., & Eltawil, A. B. (2016). Functional integration approach for the berth allocation, quay crane assignment and specific quay crane assignment problems. *Computers and Industrial Engineering*, 102, 458–466. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.04.006>
- Kaveshgar, N., Huynh, N., & Rahimian, S. K. (2012). An efficient genetic algorithm for solving the quay crane scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 39(18), 13108–13117. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.091>

- Kizilay, D., Hentenryck, P. van, & Eliiyi, D. T. (2020). Constraint programming models for integrated container terminal operations. *European Journal of Operational Research*, 286(3), 945–962. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.04.025>
- Li, W., Wu, Y., & Goh, M. (2015). Planning and scheduling for maritime container yards: Supporting and facilitating the global supply network. In *Planning and Scheduling for Maritime Container Yards: Supporting and Facilitating the Global Supply Network*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-17025-1>
- Liang, C., Huang, Y., & Yang, Y. (2009). A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for berth allocation planning. *Computers and Industrial Engineering*, 56(3), 1021–1028. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.09.024>
- Lim, A. (1998). The berth planning problem 1. In *Operations Research Letters* (Vol. 22).
- Liu, C., Zheng, L., & Zhang, C. (2016). Behavior perception-based disruption models for berth allocation and quay crane assignment problems. *Computers and Industrial Engineering*, 97, 258–275. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.04.008>
- Malekahmadi, A., Alinaghian, M., Hejazi, S. R., & Assl Saidipour, M. A. (2020). Integrated continuous berth allocation and quay crane assignment and scheduling problem with time-dependent physical constraints in container terminals. *Computers and Industrial Engineering*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106672>
- Mauri, G. R., Ribeiro, G. M., Lorena, L. A. N., & Laporte, G. (2016). An adaptive large neighborhood search for the discrete and continuous Berth allocation problem. *Computers and Operations Research*, 70, 140–154. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.01.002>
- Meisel, F., & Bierwirth, C. (2009). Heuristics for the integration of crane productivity in the berth allocation problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(1), 196–209. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2008.03.001>
- Nourmohammadzadeh, A., & Voß, S. (2022). A robust multiobjective model for the integrated berth and quay crane scheduling problem at seaside container terminals. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 90(7–9), 831–853. <https://doi.org/10.1007/s10472-021-09743-5>
- Qin, T., Du, Y., & Sha, M. (2016). Evaluating the solution performance of IP and CP for berth allocation with time-varying water depth. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 87, 167–185. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.01.007>
- Raa, B., Dullaert, W., & Schaeren, R. van. (2011). An enriched model for the integrated berth allocation and quay crane assignment problem. *Expert Systems with Applications*, 38(11), 14136–14147. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.224>
- Rodrigues, F., & Agra, A. (2021). An exact robust approach for the integrated berth allocation and quay crane scheduling problem under uncertain arrival times. *European Journal of Operational Research*, 295(2), 499–516. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.03.016>
- Roy, D., de Koster, R., & Bekker, R. (2020). Modeling and design of container terminal operations. *Operations Research*, 68(3), 686–715. <https://doi.org/10.1287/opre.2019.1920>
- SeaRates. (2023, January). Shipping container dimensions. <https://www.searates.com/reference/container/>

- Sheikholeslami, A., Ilati, G., & Kobari, M. (2013). The continuous dynamic berth allocation problem at a marine container terminal with tidal constraints in the access channel.
- Skaf, A., Lamrous, S., Hammoudan, Z., & Manier, M. A. (2021). Integrated quay crane and yard truck scheduling problem at port of Tripoli-Lebanon. *Computers and Industrial Engineering*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107448>
- Song, L., Cherrett, T., & Guan, W. (2012). Study on berth planning problem in a container seaport: Using an integrated programming approach. *Computers and Industrial Engineering*, 62(1), 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.08.024>
- Steenken, D., Voß, S., & Stahlbock, R. (2004). Container terminal operation and operations research - A classification and literature review. In *OR Spectrum* (Vol. 26, Issue 1, pp. 3–49). <https://doi.org/10.1007/s00291-003-0157-z>
- Theodorou, E., & Diabat, A. (2015). A joint quay crane assignment and scheduling problem: formulation, solution algorithm and computational results. *Optimization Letters*, 9(4), 799–817. <https://doi.org/10.1007/s11590-014-0787-x>
- Türkoğullari, Y. B., Taşkin, Z. C., Aras, N., & Altinel, I. K. (2016). Optimal berth allocation, time-variant quay crane assignment and scheduling with crane setups in container terminals. *European Journal of Operational Research*, 254(3), 985–1001. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.04.022>
- UNCTAD. (2021). REVIEW OF MARITIME TRANSPORT. UNITED NATIONS.
- Ursavas, E., & Zhu, S. X. (2016). Optimal policies for the berth allocation problem under stochastic nature. *European Journal of Operational Research*, 255(2), 380–387. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.04.029>
- Wilson, I. D., & Roach, P. A. (2000). Container stowage planning: A methodology for generating computerised solutions. *Journal of the Operational Research Society*, 51(11), 1248–1255. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601022>
- Xu, D., Li, C. L., & Leung, J. Y. T. (2012). Berth allocation with time-dependent physical limitations on vessels. *European Journal of Operational Research*, 216(1), 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.07.012>
- Yang, C., Wang, X., & Li, Z. (2012). An optimization approach for coupling problem of berth allocation and quay crane assignment in container terminal. *Computers and Industrial Engineering*, 63(1), 243–253. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.03.004>
- YILPORT Leixões. (2023a, August). Equipamentos. <http://tcl-leixoes.pt/pt/equipamentos/>
- YILPORT Leixões. (2023b, August). Terminais. <http://tcl-leixoes.pt/pt/terminais/>
- Zhang, C., Zheng, L., Zhang, Z., Shi, L., & Armstrong, A. J. (2010). The allocation of berths and quay cranes by using a sub-gradient optimization technique. *Computers and Industrial Engineering*, 58(1), 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.08.002>
- Zhang, Z., Liu, M., Lee, C. Y., & Wang, J. (2018). The Quay Crane Scheduling Problem with Stability Constraints. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 15(3), 1399–1412. <https://doi.org/10.1109/TASE.2018.2795254>

- Zhen, L. (2015). Tactical berth allocation under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 247(3), 928–944. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.079>
- Zhu, Y., & Lim, A. (2006). Crane Scheduling with Non-Crossing Constraint. In *Source: The Journal of the Operational Research Society* (Vol. 57, Issue 12).

ANEXOS

página propositadamente em branco

ANEXO A: DADOS DOS NAVIOS

No.	IN	OUT	LOA	Chegada	Start Ops	End Ops	Sailed	Terminal
1	233	28	200	01/01/2020 07:00	02/01/2020 08:24	02/01/2020 15:07	02/01/2020 17:35	Sul
2	92	128	139	01/01/2020 07:39	02/01/2020 08:34	02/01/2020 16:55	02/01/2020 18:06	Sul
3	60	205	135	01/01/2020 15:35	02/01/2020 08:26	02/01/2020 18:50	02/01/2020 22:38	Norte
4	0	171	135	01/01/2020 18:02	06/01/2020 08:45	06/01/2020 15:37	06/01/2020 18:15	Norte
5	66	95	134	01/01/2020 22:15	02/01/2020 08:27	02/01/2020 15:33	02/01/2020 16:15	Norte
6	69	190	131	02/01/2020 04:50	02/01/2020 22:50	03/01/2020 10:41	03/01/2020 11:40	Sul
7	51	107	127	02/01/2020 10:15	02/01/2020 19:03	03/01/2020 11:22	03/01/2020 12:10	Norte
8	194	177	184	02/01/2020 11:20	03/01/2020 08:40	03/01/2020 19:49	03/01/2020 22:46	Sul
9	76	100	176	02/01/2020 14:55	02/01/2020 19:40	03/01/2020 02:12	03/01/2020 06:48	Sul
10	232	313	152	02/01/2020 19:16	03/01/2020 13:40	04/01/2020 16:03	04/01/2020 17:25	Norte
11	30	42	135	03/01/2020 03:00	03/01/2020 08:23	03/01/2020 11:42	03/01/2020 12:25	Norte
12	7	343	134	03/01/2020 05:29	03/01/2020 14:55	04/01/2020 00:16	04/01/2020 01:28	Sul
13	190	40	152	03/01/2020 06:58	03/01/2020 09:15	03/01/2020 19:01	03/01/2020 21:32	Sul
14	138	104	127	03/01/2020 11:40	03/01/2020 14:06	04/01/2020 16:06	05/01/2020 17:10	Norte
15	11	173	149	03/01/2020 11:50	04/01/2020 00:52	04/01/2020 06:06	04/01/2020 07:41	Sul
16	71	148	134	03/01/2020 20:56	04/01/2020 08:25	04/01/2020 14:16	04/01/2020 15:27	Sul
17	763	1092	211	04/01/2020 04:10	04/01/2020 09:27	05/01/2020 19:59	05/01/2020 23:35	Sul
18	46	0	126	04/01/2020 05:57	04/01/2020 17:22	04/01/2020 19:45	04/01/2020 21:13	Norte
19	124	0	136	04/01/2020 07:48	06/01/2020 00:23	06/01/2020 04:08	06/01/2020 06:54	Sul
20	91	141	132	05/01/2020	05/01/2020	05/01/2020	05/01/2020	Sul

				12:30	14:17	18:31	20:25	
21	15	131	178	05/01/2020 22:10	06/01/2020 08:24	06/01/2020 13:28	06/01/2020 14:44	Sul
22	17	45	159	06/01/2020 05:10	06/01/2020 08:19	06/01/2020 10:46	06/01/2020 12:11	Norte
23	44	347	134	06/01/2020 05:29	06/01/2020 08:39	06/01/2020 18:31	06/01/2020 22:20	Sul
24	81	0	149	07/01/2020 05:29	07/01/2020 08:30	07/01/2020 11:01	07/01/2020 18:51	Sul
25	137	21	184	07/01/2020 05:30	07/01/2020 08:51	07/01/2020 17:16	07/01/2020 19:30	Sul
26	63	196	133	08/01/2020 05:30	08/01/2020 08:20	08/01/2020 13:37	08/01/2020 15:38	Sul
27	97	87	100	08/01/2020 08:42	08/01/2020 10:14	10/01/2020 16:30	10/01/2020 18:20	Norte
28	0	76	149	08/01/2020 09:53	08/01/2020 13:35	08/01/2020 14:54	08/01/2020 15:49	Sul
29	123	72	142	08/01/2020 13:06	08/01/2020 15:23	08/01/2020 19:09	09/01/2020 18:48	Sul
30	7	0	138	08/01/2020 15:24	08/01/2020 17:15	08/01/2020 18:37	08/01/2020 19:39	Sul
31	123	119	158	09/01/2020 05:33	09/01/2020 08:14	09/01/2020 16:19	09/01/2020 17:48	Sul
32	109	80	100	09/01/2020 06:47	09/01/2020 08:46	11/01/2020 11:17	11/01/2020 12:44	Norte
33	73	91	127	09/01/2020 10:26	09/01/2020 15:09	10/01/2020 16:07	10/01/2020 17:13	Norte
34	135	152	133	09/01/2020 20:33	10/01/2020 08:21	10/01/2020 15:51	10/01/2020 16:46	Sul
35	155	127	152	11/01/2020 00:16	11/01/2020 02:27	11/01/2020 12:59	11/01/2020 16:46	Sul
36	237	316	157	11/01/2020 00:16	11/01/2020 08:14	12/01/2020 17:19	12/01/2020 16:46	Norte
37	0	338	172	11/01/2020 03:06	11/01/2020 16:31	12/01/2020 09:00	13/01/2020 16:46	Sul
38	65	60	135	11/01/2020 05:20	11/01/2020 08:23	11/01/2020 14:16	14/01/2020 16:46	Sul
39	90	0	135	11/01/2020 05:59	11/01/2020 08:26	11/01/2020 11:38	15/01/2020 16:46	Sul
40	41	7	176	11/01/2020 10:55	11/01/2020 18:13	11/01/2020 19:30	16/01/2020 16:46	Sul
41	63	94	126	11/01/2020 11:00	11/01/2020 13:44	11/01/2020 19:36	11/01/2020 20:46	Norte

42	68	115	132	11/01/2020 22:18	12/01/2020 08:15	12/01/2020 11:59	12/01/2020 13:57	Sul
43	62	82	135	12/01/2020 04:00	12/01/2020 08:21	12/01/2020 15:30	12/01/2020 16:07	Norte
44	36	90	213	12/01/2020 09:50	13/01/2020 09:09	13/01/2020 16:00	13/01/2020 19:06	Norte
45	266	9	149	12/01/2020 11:33	12/01/2020 13:38	12/01/2020 19:16	12/01/2020 20:55	Sul
46	57	383	135	12/01/2020 13:55	12/01/2020 16:42	13/01/2020 04:00	13/01/2020 06:40	Sul
47	29	56	158	12/01/2020 14:30	12/01/2020 17:47	12/01/2020 19:59	12/01/2020 21:10	Norte
48	102	30	193	13/01/2020 06:25	13/01/2020 08:42	13/01/2020 15:23	13/01/2020 17:29	Sul
49	691	495	211	13/01/2020 06:40	13/01/2020 09:39	14/01/2020 09:46	14/01/2020 11:47	Sul
50	17	84	119	13/01/2020 22:00	14/01/2020 08:22	14/01/2020 11:59	14/01/2020 22:33	Norte
51	53	6	135	15/01/2020 05:22	15/01/2020 09:14	15/01/2020 11:08	15/01/2020 12:43	Sul
52	141	90	152	15/01/2020 17:37	16/01/2020 08:27	16/01/2020 14:26	16/01/2020 17:12	Sul
53	119	171	184	15/01/2020 21:24	17/01/2020 08:16	17/01/2020 14:21	17/01/2020 16:37	Sul
54	227	113	127	16/01/2020 05:16	16/01/2020 08:29	17/01/2020 23:00	18/01/2020 00:09	Norte
55	49	67	127	16/01/2020 20:20	17/01/2020 08:23	17/01/2020 15:24	17/01/2020 18:10	Norte
56	10	41	178	16/01/2020 22:15	17/01/2020 09:29	17/01/2020 11:28	17/01/2020 12:22	Sul
57	209	138	134	17/01/2020 00:36	17/01/2020 13:24	18/01/2020 05:26	18/01/2020 06:46	Sul
58	149	248	152	17/01/2020 01:00	17/01/2020 13:51	18/01/2020 05:55	18/01/2020 06:44	Sul
59	77	155	175	17/01/2020 04:58	17/01/2020 17:42	17/01/2020 23:51	18/01/2020 02:14	Sul
60	20	209	134	17/01/2020 07:48	18/01/2020 09:46	18/01/2020 18:20	18/01/2020 19:23	Sul
61	143	137	126	17/01/2020 22:05	18/01/2020 08:25	18/01/2020 18:27	18/01/2020 19:27	Sul
62	346	750	211	18/01/2020 05:55	18/01/2020 09:30	19/01/2020 16:00	19/01/2020 17:17	Sul
63	63	61	134	18/01/2020 06:02	18/01/2020 08:33	18/01/2020 13:42	18/01/2020 14:15	Norte

64	162	190	139	18/01/2020 07:16	18/01/2020 21:28	19/01/2020 18:41	19/01/2020 21:21	Sul
65	311	332	158	18/01/2020 07:52	18/01/2020 10:44	19/01/2020 17:33	19/01/2020 18:42	Norte
66	115	26	126	18/01/2020 13:23	18/01/2020 15:25	18/01/2020 22:40	18/01/2020 23:31	Norte
67	79	75	135	19/01/2020 12:00	19/01/2020 14:04	19/01/2020 19:13	19/01/2020 21:09	Norte
68	119	156	132	19/01/2020 14:58	19/01/2020 18:31	20/01/2020 03:11	20/01/2020 05:48	Sul
69	94	68	134	19/01/2020 20:20	20/01/2020 08:27	20/01/2020 14:10	20/01/2020 15:31	Sul
70	30	60	159	20/01/2020 05:27	20/01/2020 08:26	20/01/2020 11:41	20/01/2020 13:12	Norte
71	131	316	149	20/01/2020 06:00	20/01/2020 17:12	21/01/2020 06:47	21/01/2020 08:24	Sul
72	230	440	193	20/01/2020 06:52	20/01/2020 09:13	21/01/2020 10:58	21/01/2020 14:40	Sul
73	131	71	100	20/01/2020 09:45	20/01/2020 11:32	24/01/2020 19:59	25/01/2020 00:35	Norte
74	118	126	136	20/01/2020 18:20	21/01/2020 08:14	21/01/2020 18:34	21/01/2020 21:14	Norte
75	110	80	142	21/01/2020 06:33	21/01/2020 13:04	21/01/2020 19:38	21/01/2020 21:57	Sul
76	122	280	134	21/01/2020 11:42	21/01/2020 16:21	22/01/2020 03:56	22/01/2020 04:51	Sul
77	141	286	149	22/01/2020 10:02	22/01/2020 11:27	23/01/2020 01:37	23/01/2020 02:51	Sul
78	62	330	135	23/01/2020 05:39	23/01/2020 08:19	23/01/2020 16:13	23/01/2020 18:00	Sul
79	505	567	211	23/01/2020 06:33	23/01/2020 08:39	24/01/2020 06:00	24/01/2020 07:20	Sul
80	163	52	158	23/01/2020 16:17	23/01/2020 18:43	24/01/2020 15:04	24/01/2020 16:25	Norte
81	270	360	172	23/01/2020 23:22	24/01/2020 10:37	25/01/2020 14:20	25/01/2020 16:07	Sul
82	206	150	134	24/01/2020 16:25	24/01/2020 18:03	25/01/2020 07:51	25/01/2020 10:47	Sul
83	195	191	152	24/01/2020 22:58	25/01/2020 00:36	25/01/2020 15:21	25/01/2020 15:59	Sul
84	179	40	126	25/01/2020 06:05	25/01/2020 08:25	25/01/2020 21:49	25/01/2020 22:40	Norte
85	38	51	175	25/01/2020 09:28	25/01/2020 17:37	25/01/2020 19:59	25/01/2020 22:06	Sul

86	49	25	135	25/01/2020 14:22	25/01/2020 16:02	25/01/2020 18:35	25/01/2020 20:45	Sul
87	82	93	134	25/01/2020 14:25	26/01/2020 08:22	26/01/2020 15:37	26/01/2020 17:30	Norte
88	141	307	135	25/01/2020 17:47	25/01/2020 21:09	26/01/2020 15:47	26/01/2020 23:27	Sul
89	57	41	134	25/01/2020 23:13	26/01/2020 08:36	26/01/2020 14:36	26/01/2020 15:42	Norte
90	172	124	132	26/01/2020 00:20	26/01/2020 08:38	26/01/2020 17:21	26/01/2020 20:23	Sul
91	83	15	199	26/01/2020 06:00	26/01/2020 14:08	26/01/2020 17:58	26/01/2020 23:47	Sul
92	147	11	135	26/01/2020 12:43	27/01/2020 08:20	27/01/2020 15:40	27/01/2020 17:42	Sul
93	50	51	158	26/01/2020 14:35	26/01/2020 16:46	26/01/2020 19:21	26/01/2020 21:07	Norte
94	143	0	149	26/01/2020 23:30	27/01/2020 01:05	27/01/2020 06:10	27/01/2020 08:52	Sul
95	357	323	152	28/01/2020 05:23	28/01/2020 08:22	28/01/2020 23:27	29/01/2020 01:13	Norte
96	253	124	127	28/01/2020 06:04	28/01/2020 08:11	31/01/2020 22:51	31/01/2020 23:36	Sul
97	95	137	175	29/01/2020 10:13	29/01/2020 13:18	29/01/2020 19:28	29/01/2020 21:30	Sul
98	98	237	151	29/01/2020 15:40	29/01/2020 22:47	30/01/2020 11:03	30/01/2020 12:33	Sul
99	116	104	142	30/01/2020 05:40	30/01/2020 08:40	30/01/2020 19:33	30/01/2020 20:50	Norte
100	197	152	133	30/01/2020 05:45	30/01/2020 08:40	30/01/2020 22:21	30/01/2020 23:22	Sul
101	128	101	152	30/01/2020 13:31	30/01/2020 15:06	30/01/2020 23:33	31/01/2020 00:49	Sul
102	129	181	127	30/01/2020 15:32	31/01/2020 08:16	01/02/2020 11:16	01/02/2020 12:40	Sul
103	780	473	211	31/01/2020 06:21	31/01/2020 08:28	01/02/2020 08:52	01/02/2020 11:27	Sul
104	59	59	210	31/01/2020 07:15	01/02/2020 01:25	01/02/2020 09:53	01/02/2020 10:42	Norte
105	130	297	200	31/01/2020 11:30	01/02/2020 14:51	01/02/2020 23:44	02/02/2020 00:55	Sul

ANEXO B: TEMPO MÉDIO DE ATRACAÇÃO

No.	Arrived	Berthed	BerthTime	End Ops	UnBerthed	UnBerthTime	Sailed	Time to Sail	TotalBerth
1	01/01/2020 07:00	01/01/2020 08:25	85	02/01/2020 15:07	02/01/2020 17:15	128	02/01/2020 17:35	20	233
2	01/01/2020 07:39	01/01/2020 08:55	76	02/01/2020 16:55	02/01/2020 17:45	50	02/01/2020 18:06	21	147
3	01/01/2020 15:35	01/01/2020 16:30	55	02/01/2020 18:50	02/01/2020 22:30	220	02/01/2020 22:38	8	283
4	01/01/2020 18:02	04/01/2020 23:25	4643	06/01/2020 15:37	06/01/2020 18:00	143	06/01/2020 18:15	15	4801
5	01/01/2020 22:15	01/01/2020 23:15	60	02/01/2020 15:33	02/01/2020 16:05	32	02/01/2020 16:15	10	102
6	02/01/2020 04:50	02/01/2020 18:55	845	03/01/2020 10:41	03/01/2020 11:25	44	03/01/2020 11:40	15	904
7	02/01/2020 10:15	02/01/2020 18:50	515	03/01/2020 11:22	03/01/2020 12:00	38	03/01/2020 12:10	10	563
8	02/01/2020 11:20	03/01/2020 07:55	1235	03/01/2020 19:49	03/01/2020 22:30	161	03/01/2020 22:46	16	1412
9	02/01/2020 14:55	02/01/2020 19:30	275	03/01/2020 02:12	03/01/2020 06:20	248	03/01/2020 06:48	28	551
10	02/01/2020 19:16	03/01/2020 13:15	1079	04/01/2020 16:03	04/01/2020 17:15	72	04/01/2020 17:25	10	1161
11	03/01/2020 03:00	03/01/2020 07:55	295	03/01/2020 11:42	03/01/2020 12:10	28	03/01/2020 12:25	15	338
12	03/01/2020 05:29	03/01/2020 12:25	416	04/01/2020 00:16	04/01/2020 01:10	54	04/01/2020 01:28	18	488
13	03/01/2020 06:58	03/01/2020 08:40	102	03/01/2020 19:01	03/01/2020 21:15	134	03/01/2020 21:32	17	253
14	03/01/2020 11:40	03/01/2020 13:55	135	04/01/2020 16:06	04/01/2020 16:40	34	05/01/2020 17:10	1470	1639
15	03/01/2020 11:50	03/01/2020 23:15	685	04/01/2020 06:06	04/01/2020 07:25	79	04/01/2020 07:41	16	780
16	03/01/2020 20:56	03/01/2020 22:30	94	04/01/2020 14:16	04/01/2020 15:05	49	04/01/2020 15:27	22	165
17	04/01/2020 04:10	04/01/2020 08:55	285	05/01/2020 19:59	05/01/2020 23:12	193	05/01/2020 23:35	23	501
18	04/01/2020 05:57	04/01/2020 16:55	658	04/01/2020 19:45	04/01/2020 21:05	80	04/01/2020 21:13	8	746
19	04/01/2020 07:48	05/01/2020 21:20	2252	06/01/2020 04:08	06/01/2020 06:35	147	06/01/2020 06:54	19	2418
20	05/01/2020 12:30	05/01/2020 13:40	70	05/01/2020 18:31	05/01/2020 20:05	94	05/01/2020 20:25	20	184
21	05/01/2020 22:10	06/01/2020 00:40	150	06/01/2020 13:28	06/01/2020 14:20	52	06/01/2020 14:44	24	226
22	06/01/2020 05:10	06/01/2020 06:35	85	06/01/2020 10:46	06/01/2020 12:00	74	06/01/2020 12:11	11	170
23	06/01/2020 05:29	06/01/2020 08:10	161	06/01/2020 18:31	06/01/2020 22:05	214	06/01/2020 22:20	15	390
24	07/01/2020 05:29	07/01/2020 06:25	56	07/01/2020 11:01	07/01/2020 18:35	454	07/01/2020 18:51	16	526
25	07/01/2020 05:30	07/01/2020 07:45	135	07/01/2020 17:16	07/01/2020 19:10	114	07/01/2020 19:30	20	269
26	08/01/2020 05:30	08/01/2020 06:35	65	08/01/2020 13:37	08/01/2020 15:20	103	08/01/2020 15:38	18	186
27	08/01/2020 08:42	08/01/2020 09:30	48	10/01/2020 16:30	10/01/2020 18:10	100	10/01/2020 18:20	10	158
28	08/01/2020 09:53	08/01/2020 11:00	67	08/01/2020 14:54	08/01/2020 15:30	36	08/01/2020 15:49	19	122
29	08/01/2020 13:06	08/01/2020 14:45	99	08/01/2020 19:09	09/01/2020 18:20	1391	09/01/2020 18:48	28	1518
30	08/01/2020 15:24	08/01/2020 16:30	66	08/01/2020 18:37	08/01/2020 19:15	38	08/01/2020 19:39	24	128
31	09/01/2020 05:33	09/01/2020 06:35	62	09/01/2020 16:19	09/01/2020 17:30	71	09/01/2020 17:48	18	151
32	09/01/2020 06:47	09/01/2020 08:05	78	11/01/2020 11:17	11/01/2020 12:35	78	11/01/2020 12:44	9	165
33	09/01/2020 10:26	09/01/2020 14:40	254	10/01/2020 16:07	10/01/2020 17:00	53	10/01/2020 17:13	13	320
34	09/01/2020 20:33	09/01/2020 21:50	77	10/01/2020 15:51	10/01/2020 16:30	39	10/01/2020 16:46	16	132
35	11/01/2020 00:16	11/01/2020 01:45	89	11/01/2020 12:59	11/01/2020 13:40	41	11/01/2020 14:03	23	153
36	11/01/2020 00:16	11/01/2020 01:45	89	12/01/2020 17:19	12/01/2020 18:00	41	12/01/2020 18:12	12	142
37	11/01/2020 03:06	11/01/2020 15:55	769	12/01/2020 09:00	12/01/2020 11:10	130	12/01/2020 11:32	22	921
38	11/01/2020 05:20	11/01/2020 06:50	90	11/01/2020 14:16	11/01/2020 15:05	49	11/01/2020 15:24	19	158
39	11/01/2020 05:59	11/01/2020 07:45	106	11/01/2020 11:38	11/01/2020 13:30	112	11/01/2020 13:51	21	239
40	11/01/2020 10:55	11/01/2020 17:55	420	11/01/2020 19:30	11/01/2020 21:15	105	11/01/2020 21:32	17	542
41	11/01/2020 11:00	11/01/2020 13:30	150	11/01/2020 19:36	11/01/2020 20:35	59	11/01/2020 20:46	11	220

42	11/01/2020 22:18	11/01/2020 23:25	67	12/01/2020 11:59	12/01/2020 13:40	101	12/01/2020 13:57	17	185
43	12/01/2020 04:00	12/01/2020 06:40	160	12/01/2020 15:30	12/01/2020 16:00	30	12/01/2020 16:07	7	197
44	12/01/2020 09:50	12/01/2020 22:15	745	13/01/2020 16:00	13/01/2020 18:50	170	13/01/2020 19:06	16	931
45	12/01/2020 11:33	12/01/2020 12:30	57	12/01/2020 19:16	12/01/2020 20:30	74	12/01/2020 20:55	25	156
46	12/01/2020 13:55	12/01/2020 15:15	80	13/01/2020 04:00	13/01/2020 06:25	145	13/01/2020 06:40	15	240
47	12/01/2020 14:30	12/01/2020 17:25	175	12/01/2020 19:59	12/01/2020 21:00	61	12/01/2020 21:10	10	246
48	13/01/2020 06:25	13/01/2020 08:10	105	13/01/2020 15:23	13/01/2020 17:05	102	13/01/2020 17:29	24	231
49	13/01/2020 06:40	13/01/2020 08:43	123	14/01/2020 09:46	14/01/2020 11:25	99	14/01/2020 11:47	22	244
50	13/01/2020 22:00	13/01/2020 22:55	55	14/01/2020 11:59	14/01/2020 14:15	136	14/01/2020 22:33	498	689
51	15/01/2020 05:22	15/01/2020 09:10	228	15/01/2020 11:08	15/01/2020 12:20	72	15/01/2020 12:43	23	323
52	15/01/2020 17:37	15/01/2020 18:40	63	16/01/2020 14:26	16/01/2020 16:55	149	16/01/2020 17:12	17	229
53	15/01/2020 21:24	16/01/2020 18:55	1291	17/01/2020 14:21	17/01/2020 16:25	124	17/01/2020 16:37	12	1427
54	16/01/2020 05:16	16/01/2020 06:55	99	17/01/2020 23:00	18/01/2020 00:02	62	18/01/2020 00:09	7	168
55	16/01/2020 20:20	16/01/2020 21:30	70	17/01/2020 15:24	17/01/2020 18:00	156	17/01/2020 18:10	10	236
56	16/01/2020 22:15	17/01/2020 09:00	645	17/01/2020 11:28	17/01/2020 12:05	37	17/01/2020 12:22	17	699
57	17/01/2020 00:36	17/01/2020 12:40	724	18/01/2020 05:26	18/01/2020 06:28	62	18/01/2020 06:46	18	804
58	17/01/2020 01:00	17/01/2020 13:25	745	18/01/2020 05:55	18/01/2020 06:25	30	18/01/2020 06:44	19	794
59	17/01/2020 04:58	17/01/2020 17:20	742	17/01/2020 23:51	18/01/2020 01:55	124	18/01/2020 02:14	19	885
60	17/01/2020 07:48	18/01/2020 08:25	1477	18/01/2020 18:20	18/01/2020 19:05	45	18/01/2020 19:23	18	1540
61	17/01/2020 22:05	18/01/2020 07:35	570	18/01/2020 18:27	18/01/2020 19:08	41	18/01/2020 19:27	19	630
62	18/01/2020 05:55	18/01/2020 09:00	185	19/01/2020 16:00	19/01/2020 17:00	60	19/01/2020 17:17	17	262
63	18/01/2020 06:02	18/01/2020 07:35	93	18/01/2020 13:42	18/01/2020 14:00	18	18/01/2020 14:15	15	126
64	18/01/2020 07:16	18/01/2020 20:30	794	19/01/2020 18:41	19/01/2020 21:05	144	19/01/2020 21:21	16	954
65	18/01/2020 07:52	18/01/2020 10:15	143	19/01/2020 17:33	19/01/2020 18:35	62	19/01/2020 18:42	7	212
66	18/01/2020 13:23	18/01/2020 15:00	97	18/01/2020 22:40	18/01/2020 23:20	40	18/01/2020 23:31	11	148
67	19/01/2020 12:00	19/01/2020 13:15	75	19/01/2020 19:13	19/01/2020 21:00	107	19/01/2020 21:09	9	191
68	19/01/2020 14:58	19/01/2020 18:05	187	20/01/2020 03:11	20/01/2020 05:30	139	20/01/2020 05:48	18	344
69	19/01/2020 20:20	19/01/2020 22:20	120	20/01/2020 14:10	20/01/2020 15:10	60	20/01/2020 15:31	21	201
70	20/01/2020 05:27	20/01/2020 06:45	78	20/01/2020 11:41	20/01/2020 13:00	79	20/01/2020 13:12	12	169
71	20/01/2020 06:00	20/01/2020 16:20	620	21/01/2020 06:47	21/01/2020 08:00	73	21/01/2020 08:24	24	717
72	20/01/2020 06:52	20/01/2020 08:25	93	21/01/2020 10:58	21/01/2020 14:20	202	21/01/2020 14:40	20	315
73	20/01/2020 09:45	20/01/2020 11:00	75	24/01/2020 19:59	25/01/2020 00:30	271	25/01/2020 00:35	5	351
74	20/01/2020 18:20	20/01/2020 19:30	70	21/01/2020 18:34	21/01/2020 21:05	151	21/01/2020 21:14	9	230
75	21/01/2020 06:33	21/01/2020 09:05	152	21/01/2020 19:38	21/01/2020 21:35	117	21/01/2020 21:57	22	291
76	21/01/2020 11:42	21/01/2020 15:30	228	22/01/2020 03:56	22/01/2020 04:33	37	22/01/2020 04:51	18	283
77	22/01/2020 10:02	22/01/2020 10:55	53	23/01/2020 01:37	23/01/2020 02:35	58	23/01/2020 02:51	16	127
78	23/01/2020 05:39	23/01/2020 07:20	101	23/01/2020 16:13	23/01/2020 17:20	67	23/01/2020 18:00	40	208
79	23/01/2020 06:33	23/01/2020 08:20	107	24/01/2020 06:00	24/01/2020 07:00	60	24/01/2020 07:20	20	187
80	23/01/2020 16:17	23/01/2020 17:20	63	24/01/2020 15:04	24/01/2020 16:20	76	24/01/2020 16:25	5	144
81	23/01/2020 23:22	24/01/2020 09:00	578	25/01/2020 14:20	25/01/2020 15:40	80	25/01/2020 16:07	27	685
82	24/01/2020 16:25	24/01/2020 17:40	75	25/01/2020 07:51	25/01/2020 10:20	149	25/01/2020 10:47	27	251
83	24/01/2020 22:58	25/01/2020 00:05	67	25/01/2020 15:21	25/01/2020 15:45	24	25/01/2020 15:59	14	105
84	25/01/2020 06:05	25/01/2020 07:30	85	25/01/2020 21:49	25/01/2020 22:30	41	25/01/2020 22:40	10	136
85	25/01/2020 09:28	25/01/2020 17:05	457	25/01/2020 19:59	25/01/2020 21:45	106	25/01/2020 22:06	21	584
86	25/01/2020 14:22	25/01/2020 15:35	73	25/01/2020 18:35	25/01/2020 20:25	110	25/01/2020 20:45	20	203
87	25/01/2020 14:25	25/01/2020 23:35	550	26/01/2020 15:37	26/01/2020 16:55	78	26/01/2020 17:30	35	663

88	25/01/2020 17:47	25/01/2020 19:00	73	26/01/2020 15:47	26/01/2020 23:10	443	26/01/2020 23:27	17	533
89	25/01/2020 23:13	26/01/2020 00:20	67	26/01/2020 14:36	26/01/2020 15:30	54	26/01/2020 15:42	12	133
90	26/01/2020 00:20	26/01/2020 01:35	75	26/01/2020 17:21	26/01/2020 20:00	159	26/01/2020 20:23	23	257
91	26/01/2020 06:00	26/01/2020 13:00	420	26/01/2020 17:58	26/01/2020 23:25	327	26/01/2020 23:47	22	769
92	26/01/2020 12:43	26/01/2020 22:15	572	27/01/2020 15:40	27/01/2020 17:20	100	27/01/2020 17:42	22	694
93	26/01/2020 14:35	26/01/2020 16:20	105	26/01/2020 19:21	26/01/2020 20:55	94	26/01/2020 21:07	12	211
94	26/01/2020 23:30	27/01/2020 00:35	65	27/01/2020 06:10	27/01/2020 08:30	140	27/01/2020 08:52	22	227
95	28/01/2020 05:23	28/01/2020 06:35	72	28/01/2020 23:27	29/01/2020 00:55	88	29/01/2020 01:13	18	178
96	28/01/2020 06:04	28/01/2020 07:35	91	31/01/2020 22:51	31/01/2020 23:30	39	31/01/2020 23:36	6	136
97	29/01/2020 10:13	29/01/2020 11:30	77	29/01/2020 19:28	29/01/2020 21:15	107	29/01/2020 21:30	15	199
98	29/01/2020 15:40	29/01/2020 22:15	395	30/01/2020 11:03	30/01/2020 12:05	62	30/01/2020 12:33	28	485
99	30/01/2020 05:40	30/01/2020 06:35	55	30/01/2020 19:33	30/01/2020 20:40	67	30/01/2020 20:50	10	132
100	30/01/2020 05:45	30/01/2020 07:40	115	30/01/2020 22:21	30/01/2020 23:00	39	30/01/2020 23:22	22	176
101	30/01/2020 13:31	30/01/2020 14:35	64	30/01/2020 23:33	31/01/2020 00:30	57	31/01/2020 00:49	19	140
102	30/01/2020 15:32	31/01/2020 00:01	509	01/02/2020 11:16	01/02/2020 12:30	74	01/02/2020 12:40	10	593
103	31/01/2020 06:21	31/01/2020 07:40	79	01/02/2020 08:52	01/02/2020 11:10	138	01/02/2020 11:27	17	234
104	31/01/2020 07:15	01/02/2020 00:20	1025	01/02/2020 09:53	01/02/2020 10:30	37	01/02/2020 10:42	12	1074
105	31/01/2020 11:30	01/02/2020 13:40	1570	01/02/2020 23:44	02/02/2020 00:35	51	02/02/2020 00:55	20	1641

ANEXO C: RESULTADOS

	No.	1	2	3	4	5
Start Ops	Arrived	01/01/2020 07:00	01/01/2020 07:39	01/01/2020 15:35	01/01/2020 18:02	01/01/2020 22:15
	CPLEX	01/01/2020 10:00	01/01/2020 10:39	01/01/2020 18:35	01/01/2020 21:02	02/01/2020 02:01
	REAL	02/01/2020 08:24	02/01/2020 08:34	02/01/2020 08:26	06/01/2020 08:45	02/01/2020 08:27
Tempo de Espera	CPLEX	3	3	3	3	3,8
	REAL	25,4	24,9	16,9	110,7	10,2
Gruas Sul	4	131				81
	3	130				80
	2			132		
	1			133		
Gruas Norte	2		110			
	1		110		171	
End Ops	CPLEX	01/01/2020 14:22	01/01/2020 15:14	01/01/2020 23:01	02/01/2020 04:09	02/01/2020 04:43
	REAL	02/01/2020 15:07	02/01/2020 16:55	02/01/2020 18:50	06/01/2020 15:37	02/01/2020 15:33
Sailed	CPLEX	01/01/2020 18:35	01/01/2020 18:14	02/01/2020 02:01	02/01/2020 07:09	02/01/2020 07:43
	REAL	02/01/2020 17:35	02/01/2020 18:06	02/01/2020 22:38	06/01/2020 18:15	02/01/2020 16:15
Terminal	CPLEX	Sul	Norte	Sul	Norte	Sul
	REAL	Sul	Sul	Norte	Norte	Norte
Tempo de Operação (minutos)	CPLEX	262	275	266	428	162
	REAL	403	501	624	412	426

6	7	8	9	10	11	12
02/01/2020 04:50	02/01/2020 10:15	02/01/2020 11:20	02/01/2020 14:55	02/01/2020 19:16	03/01/2020 03:00	03/01/2020 05:29
02/01/2020 07:50	02/01/2020 13:15	02/01/2020 15:10	02/01/2020 19:32	03/01/2020 00:22	03/01/2020 06:00	03/01/2020 12:28
02/01/2020 22:50	02/01/2020 19:03	03/01/2020 08:40	02/01/2020 19:40	03/01/2020 13:40	03/01/2020 08:23	03/01/2020 14:55
3	3	3,8	4,6	5,1	3	7
18	8,8	21,3	4,7	18,4	5,4	9,4
129				273		
130				273		
		186				350
	79				36	
	79		176		36	
02/01/2020 12:10	02/01/2020 16:32	02/01/2020 21:22	03/01/2020 02:52	03/01/2020 09:28	03/01/2020 07:30	03/01/2020 18:18
03/01/2020 10:41	03/01/2020 11:22	03/01/2020 19:49	03/01/2020 02:12	04/01/2020 16:03	03/01/2020 11:42	04/01/2020 00:16
02/01/2020 15:10	02/01/2020 19:32	03/01/2020 00:22	03/01/2020 05:52	03/01/2020 12:28	03/01/2020 10:30	03/01/2020 21:18
03/01/2020 11:40	03/01/2020 12:10	03/01/2020 22:46	03/01/2020 06:48	04/01/2020 17:25	03/01/2020 12:25	04/01/2020 01:28
Sul	Norte	Sul	Norte	Sul	Norte	Sul
Sul	Norte	Sul	Sul	Norte	Norte	Sul
260	198	372	440	546	90	350
711	979	669	392	1583	199	561

13	14	15	16	17	18	19
03/01/2020 06:58	03/01/2020 11:40	03/01/2020 11:50	03/01/2020 20:56	04/01/2020 04:10	04/01/2020 05:57	04/01/2020 07:48
03/01/2020 10:30	03/01/2020 18:17	03/01/2020 21:18	04/01/2020 02:20	04/01/2020 07:10	04/01/2020 09:55	04/01/2020 13:52
03/01/2020 09:15	03/01/2020 14:06	04/01/2020 00:52	04/01/2020 08:25	04/01/2020 09:27	04/01/2020 17:22	06/01/2020 00:23
3,5	6,6	9,5	5,4	3	4	6,1
2,3	2,4	13	11,5	5,3	11,4	40,6
		184				
				476		
				1379		
115	121		109		23	
115	121		110		23	124
03/01/2020 15:17	03/01/2020 23:20	04/01/2020 03:26	04/01/2020 06:55	06/01/2020 05:08	04/01/2020 10:52	04/01/2020 19:02
03/01/2020 19:01	04/01/2020 16:06	04/01/2020 06:06	04/01/2020 14:16	05/01/2020 19:59	04/01/2020 19:45	06/01/2020 04:08
03/01/2020 18:17	04/01/2020 02:20	04/01/2020 06:26	04/01/2020 09:55	06/01/2020 08:10	04/01/2020 13:52	04/01/2020 22:02
03/01/2020 21:32	05/01/2020 17:10	04/01/2020 07:41	04/01/2020 15:27	05/01/2020 23:35	04/01/2020 21:13	06/01/2020 06:54
Norte	Norte	Sul	Norte	Sul	Norte	Norte
Sul	Norte	Sul	Sul	Sul	Norte	Sul
288	303	368	275	2758	57	310
586	1560	314	351	2072	143	225

20	21	22	23	24	25	26
05/01/2020 12:30	05/01/2020 22:10	06/01/2020 05:10	06/01/2020 05:29	07/01/2020 05:29	07/01/2020 05:30	08/01/2020 05:30
05/01/2020 15:30	06/01/2020 01:10	06/01/2020 08:10	06/01/2020 08:29	07/01/2020 08:29	07/01/2020 08:30	08/01/2020 08:30
05/01/2020 14:17	06/01/2020 08:24	06/01/2020 08:19	06/01/2020 08:39	07/01/2020 08:30	07/01/2020 08:51	08/01/2020 08:20
3	3	3	3	3	3	3
1,8	10,2	3,1	3,2	3	3,4	2,8
						130
						129
73	95		391			
159	51			81		
05/01/2020 22:07	06/01/2020 05:07	06/01/2020 10:14	07/01/2020 00:44	07/01/2020 11:49	07/01/2020 13:46	08/01/2020 12:50
05/01/2020 18:31	06/01/2020 13:28	06/01/2020 10:46	06/01/2020 18:31	07/01/2020 11:01	07/01/2020 17:16	08/01/2020 13:37
06/01/2020 01:07	06/01/2020 08:10	06/01/2020 13:14	07/01/2020 03:44	07/01/2020 14:49	08/01/2020 08:30	08/01/2020 15:50
05/01/2020 20:25	06/01/2020 14:44	06/01/2020 12:11	06/01/2020 22:20	07/01/2020 18:51	07/01/2020 19:30	08/01/2020 15:38
Norte	Norte	Sul	Norte	Norte	Sul	Sul
Sul	Sul	Norte	Sul	Sul	Sul	Sul
397	237	124	975	200	316	260
254	304	147	592	151	505	317

27	28	29	30	31	32	33
08/01/2020 08:42	08/01/2020 09:53	08/01/2020 13:06	08/01/2020 15:24	09/01/2020 05:33	09/01/2020 06:47	09/01/2020 10:26
08/01/2020 11:42	08/01/2020 15:50	08/01/2020 18:32	08/01/2020 20:06	09/01/2020 08:33	09/01/2020 09:47	09/01/2020 15:35
08/01/2020 10:14	08/01/2020 13:35	08/01/2020 15:23	08/01/2020 17:15	09/01/2020 08:14	09/01/2020 08:46	09/01/2020 15:09
3	5,9	5,4	4,7	3	3	5,2
1,5	3,7	2,3	1,8	2,7	2	4,7
			7			164
	38			121		
	38			121		
92		98				
92		97				
08/01/2020 15:32	08/01/2020 17:06	08/01/2020 22:37	08/01/2020 20:20	09/01/2020 12:35	09/01/2020 17:39	09/01/2020 21:03
10/01/2020 16:30	08/01/2020 14:54	08/01/2020 19:09	08/01/2020 18:37	09/01/2020 16:19	11/01/2020 11:17	10/01/2020 16:07
08/01/2020 18:32	08/01/2020 20:06	09/01/2020 01:37	08/01/2020 23:20	09/01/2020 15:35	09/01/2020 20:39	10/01/2020 00:03
10/01/2020 18:20	08/01/2020 15:49	09/01/2020 18:48	08/01/2020 19:39	09/01/2020 17:48	11/01/2020 12:44	10/01/2020 17:13
Norte	Sul	Norte	Sul	Sul	Norte	Sul
Norte	Sul	Sul	Sul	Sul	Norte	Norte
230	76	245	14	242	473	328
3256	79	226	82	485	3031	1498

34	35	36	37	38	39	40
09/01/2020 20:33	11/01/2020 00:16	11/01/2020 00:16	11/01/2020 03:06	11/01/2020 05:20	11/01/2020 05:59	11/01/2020 10:55
09/01/2020 23:33	11/01/2020 03:16	11/01/2020 03:16	11/01/2020 19:18	11/01/2020 17:01	11/01/2020 12:08	11/01/2020 15:30
10/01/2020 08:21	11/01/2020 02:27	11/01/2020 08:14	11/01/2020 16:31	11/01/2020 08:23	11/01/2020 08:26	11/01/2020 18:13
3	3	3	16,2	11,7	6,2	4,6
11,8	2,2	8	13,4	3,1	2,5	7,3
			169			
			169			
			277			
		276				48
189	141	141		125	45	
	141				45	
10/01/2020 11:30	11/01/2020 09:08	11/01/2020 12:30	12/01/2020 00:56	11/01/2020 22:13	11/01/2020 14:01	11/01/2020 17:06
10/01/2020 15:51	11/01/2020 12:59	12/01/2020 17:19	12/01/2020 09:00	11/01/2020 14:16	11/01/2020 11:38	11/01/2020 19:30
10/01/2020 14:30	11/01/2020 12:08	11/01/2020 15:30	12/01/2020 03:56	12/01/2020 01:13	11/01/2020 17:01	11/01/2020 20:06
10/01/2020 16:46	11/01/2020 16:46	12/01/2020 16:46	13/01/2020 16:46	14/01/2020 16:46	15/01/2020 16:46	16/01/2020 16:46
Norte	Norte	Sul	Sul	Norte	Norte	Sul
Sul	Sul	Norte	Sul	Sul	Sul	Sul
718	352	554	338	313	113	96
450	632	1985	989	353	192	77

41	42	43	44	45	46	47
11/01/2020 11:00	11/01/2020 22:18	12/01/2020 04:00	12/01/2020 09:50	12/01/2020 11:33	12/01/2020 13:55	12/01/2020 14:30
11/01/2020 17:01	12/01/2020 01:18	12/01/2020 07:00	12/01/2020 12:50	12/01/2020 14:33	12/01/2020 22:22	12/01/2020 17:56
11/01/2020 13:44	12/01/2020 08:15	12/01/2020 08:21	13/01/2020 09:09	12/01/2020 13:38	12/01/2020 16:42	12/01/2020 17:47
6	3	3	3	3	8,5	3,4
2,7	9,9	4,4	23,3	2,1	2,8	3,3
			63		440	
		72	63			
		72				85
78	183			137		
79				138		
11/01/2020 20:18	12/01/2020 08:55	12/01/2020 09:24	12/01/2020 14:56	12/01/2020 20:18	13/01/2020 13:02	12/01/2020 20:46
11/01/2020 19:36	12/01/2020 11:59	12/01/2020 15:30	13/01/2020 16:00	12/01/2020 19:16	13/01/2020 04:00	12/01/2020 19:59
11/01/2020 23:18	12/01/2020 12:50	12/01/2020 12:24	12/01/2020 17:56	12/01/2020 23:18	13/01/2020 16:02	12/01/2020 23:46
11/01/2020 20:46	12/01/2020 13:57	12/01/2020 16:07	13/01/2020 19:06	12/01/2020 20:55	13/01/2020 06:40	12/01/2020 21:10
Norte	Norte	Sul	Sul	Norte	Sul	Sul
Norte	Sul	Norte	Norte	Sul	Sul	Norte
198	458	144	126	345	880	170
352	224	429	411	338	678	132

48	49	50	51	52	53	54
13/01/2020 06:25	13/01/2020 06:40	13/01/2020 22:00	15/01/2020 05:22	15/01/2020 17:37	15/01/2020 21:24	16/01/2020 05:16
13/01/2020 09:25	13/01/2020 09:40	14/01/2020 01:00	15/01/2020 08:22	15/01/2020 20:37	16/01/2020 00:24	16/01/2020 08:16
13/01/2020 08:42	13/01/2020 09:39	14/01/2020 08:22	15/01/2020 09:14	16/01/2020 08:27	17/01/2020 08:16	16/01/2020 08:29
3	3	3	3	3	3	3
2,3	3	10,4	3,9	14,8	34,9	3,2
					145	
					145	170
						170
					24	
132		101	59	207		
13/01/2020 14:55	14/01/2020 05:26	14/01/2020 05:12	15/01/2020 10:49	16/01/2020 05:14	16/01/2020 05:14	16/01/2020 13:56
13/01/2020 15:23	14/01/2020 09:46	14/01/2020 11:59	15/01/2020 11:08	16/01/2020 14:26	17/01/2020 14:21	17/01/2020 23:00
14/01/2020 01:00	15/01/2020 08:22	15/01/2020 08:22	15/01/2020 13:49	16/01/2020 08:16	16/01/2020 08:16	17/01/2020 01:15
13/01/2020 17:29	14/01/2020 11:47	14/01/2020 22:33	15/01/2020 12:43	16/01/2020 17:12	17/01/2020 16:37	18/01/2020 00:09
Norte	Sul	Norte	Norte	Norte	Sul	Sul
Sul	Sul	Norte	Sul	Sul	Sul	Norte
330	1186	252	147	518	290	340
401	1447	217	114	359	365	2311

55	56	57	58	59	60	61
16/01/2020 20:20	16/01/2020 22:15	17/01/2020 00:36	17/01/2020 01:00	17/01/2020 04:58	17/01/2020 07:48	17/01/2020 22:05
16/01/2020 23:20	17/01/2020 01:15	17/01/2020 04:45	17/01/2020 05:07	17/01/2020 14:45	17/01/2020 15:00	18/01/2020 01:05
17/01/2020 08:23	17/01/2020 09:29	17/01/2020 13:24	17/01/2020 13:51	17/01/2020 17:42	18/01/2020 09:46	18/01/2020 08:25
3	3	4,2	4,1	9,8	7,2	3
12,1	11,2	12,8	12,8	12,7	26	10,3
			199	219		
	51		198	13		144
						136
58		173			60	
58		174			169	
17/01/2020 01:45	17/01/2020 02:07	17/01/2020 12:00	17/01/2020 11:45	17/01/2020 22:03	17/01/2020 22:02	18/01/2020 05:53
17/01/2020 15:24	17/01/2020 11:28	18/01/2020 05:26	18/01/2020 05:55	17/01/2020 23:51	18/01/2020 18:20	18/01/2020 18:27
17/01/2020 04:45	17/01/2020 05:07	17/01/2020 15:00	17/01/2020 14:45	18/01/2020 01:05	18/01/2020 01:05	18/01/2020 08:55
17/01/2020 18:10	17/01/2020 12:22	18/01/2020 06:46	18/01/2020 06:44	18/01/2020 02:14	18/01/2020 19:23	18/01/2020 19:27
Norte	Sul	Norte	Sul	Sul	Norte	Sul
Norte	Sul	Sul	Sul	Sul	Sul	Sul
145	52	435	398	438	423	288
421	119	962	964	369	514	602

62	63	64	65	66	67	68
18/01/2020 05:55	18/01/2020 06:02	18/01/2020 07:16	18/01/2020 07:52	18/01/2020 13:23	19/01/2020 12:00	19/01/2020 14:58
18/01/2020 08:55	18/01/2020 09:02	18/01/2020 14:06	19/01/2020 04:20	18/01/2020 22:58	19/01/2020 15:00	19/01/2020 18:04
18/01/2020 09:30	18/01/2020 08:33	18/01/2020 21:28	18/01/2020 10:44	18/01/2020 15:25	19/01/2020 14:04	19/01/2020 18:31
3	3	6,8	20,5	9,6	3	3,1
3,6	2,5	14,2	2,9	2	2,1	3,5
	62			71		275
	62			70		
		176	322			
		176	321			
447					27	
649					127	
19/01/2020 11:57	18/01/2020 11:06	18/01/2020 19:58	19/01/2020 15:04	19/01/2020 01:20	19/01/2020 20:17	20/01/2020 03:14
19/01/2020 16:00	18/01/2020 13:42	19/01/2020 18:41	19/01/2020 17:33	18/01/2020 22:40	19/01/2020 19:13	20/01/2020 03:11
19/01/2020 15:00	18/01/2020 14:06	18/01/2020 22:58	19/01/2020 18:04	19/01/2020 04:20	19/01/2020 23:20	20/01/2020 06:14
19/01/2020 17:17	18/01/2020 14:15	19/01/2020 21:21	19/01/2020 18:42	18/01/2020 23:31	19/01/2020 21:09	20/01/2020 05:48
Norte	Sul	Sul	Sul	Sul	Norte	Sul
Sul	Norte	Sul	Norte	Norte	Norte	Sul
1622	124	352	644	142	317	550
1830	309	1273	1849	435	309	520

69	70	71	72	73	74	75
19/01/2020 20:20	20/01/2020 05:27	20/01/2020 06:00	20/01/2020 06:52	20/01/2020 09:45	20/01/2020 18:20	21/01/2020 06:33
19/01/2020 23:20	20/01/2020 08:27	20/01/2020 09:00	20/01/2020 19:19	20/01/2020 12:57	20/01/2020 21:20	21/01/2020 09:33
20/01/2020 08:27	20/01/2020 08:26	20/01/2020 17:12	20/01/2020 09:13	20/01/2020 11:32	21/01/2020 08:14	21/01/2020 13:04
3	3	3	12,4	3,2	3	3
12,1	3	11,2	2,3	1,8	13,9	6,5
	45		335			
	45		335			190
				101		
				101		
146		223			122	
16		224			122	
20/01/2020 05:25	20/01/2020 09:57	20/01/2020 18:20	21/01/2020 06:29	20/01/2020 16:19	21/01/2020 02:25	21/01/2020 15:53
20/01/2020 14:10	20/01/2020 11:41	21/01/2020 06:47	21/01/2020 10:58	24/01/2020 19:59	21/01/2020 18:34	21/01/2020 19:38
20/01/2020 08:27	20/01/2020 12:57	20/01/2020 21:20	21/01/2020 09:29	20/01/2020 19:19	21/01/2020 09:29	21/01/2020 18:53
20/01/2020 15:31	20/01/2020 13:12	21/01/2020 08:24	21/01/2020 14:40	25/01/2020 00:35	21/01/2020 21:14	21/01/2020 21:57
Norte	Sul	Norte	Sul	Sul	Norte	Sul
Sul	Norte	Sul	Sul	Norte	Norte	Sul
365	90	560	670	202	305	380
343	195	815	1545	6267	620	394

76	77	78	79	80	81	82
21/01/2020 11:42	22/01/2020 10:02	23/01/2020 05:39	23/01/2020 06:33	23/01/2020 16:17	23/01/2020 23:22	24/01/2020 16:25
21/01/2020 14:42	22/01/2020 13:02	23/01/2020 08:39	23/01/2020 09:33	23/01/2020 19:49	24/01/2020 03:19	24/01/2020 19:26
21/01/2020 16:21	22/01/2020 11:27	23/01/2020 08:19	23/01/2020 08:39	23/01/2020 18:43	24/01/2020 10:37	24/01/2020 18:03
3	3	3	3	3,5	4	3
4,6	1,4	2,7	2,1	2,4	11,3	1,6
	214		536			
	213		536			
		196		108	315	178
		196		107	315	178
22/01/2020 07:27	22/01/2020 20:10	23/01/2020 16:49	24/01/2020 03:25	24/01/2020 00:19	24/01/2020 16:26	25/01/2020 02:51
22/01/2020 03:56	23/01/2020 01:37	23/01/2020 16:13	24/01/2020 06:00	24/01/2020 15:04	25/01/2020 14:20	25/01/2020 07:51
22/01/2020 10:27	23/01/2020 08:39	23/01/2020 19:49	24/01/2020 19:26	24/01/2020 03:19	24/01/2020 19:26	25/01/2020 09:05
22/01/2020 04:51	23/01/2020 02:51	23/01/2020 18:00	24/01/2020 07:20	24/01/2020 16:25	25/01/2020 16:07	25/01/2020 10:47
Norte	Sul	Norte	Sul	Norte	Norte	Norte
Sul	Sul	Sul	Sul	Norte	Sul	Sul
1005	428	490	1072	270	788	445
695	850	474	1281	1221	1663	828

83	84	85	86	87	88	89
24/01/2020 22:58	25/01/2020 06:05	25/01/2020 09:28	25/01/2020 14:22	25/01/2020 14:25	25/01/2020 17:47	25/01/2020 23:13
25/01/2020 01:58	25/01/2020 09:05	25/01/2020 12:28	25/01/2020 17:22	25/01/2020 17:25	25/01/2020 21:36	26/01/2020 02:13
25/01/2020 00:36	25/01/2020 08:25	25/01/2020 17:37	25/01/2020 16:02	26/01/2020 08:22	25/01/2020 21:09	26/01/2020 08:36
3	3	3	3	3	3,8	3
1,6	2,3	8,2	1,7	18	3,4	9,4
			37			
			37			
193		44			251	
193		45			197	
	109			36		49
	110			139		49
25/01/2020 08:24	25/01/2020 13:40	25/01/2020 13:58	25/01/2020 18:36	25/01/2020 23:12	26/01/2020 05:58	26/01/2020 04:15
25/01/2020 15:21	25/01/2020 21:49	25/01/2020 19:59	25/01/2020 18:35	26/01/2020 15:37	26/01/2020 15:47	26/01/2020 14:36
25/01/2020 11:24	25/01/2020 17:25	25/01/2020 17:22	25/01/2020 21:36	26/01/2020 02:13	26/01/2020 09:00	26/01/2020 07:15
25/01/2020 15:59	25/01/2020 22:40	25/01/2020 22:06	25/01/2020 20:45	26/01/2020 17:30	26/01/2020 23:27	26/01/2020 15:42
Sul	Norte	Sul	Sul	Norte	Sul	Norte
Sul	Norte	Sul	Sul	Norte	Sul	Norte
386	275	90	74	348	502	123
885	804	142	153	435	1118	360

90	91	92	93	94	95	96
26/01/2020 00:20	26/01/2020 06:00	26/01/2020 12:43	26/01/2020 14:35	26/01/2020 23:30	28/01/2020 05:23	28/01/2020 06:04
26/01/2020 07:15	26/01/2020 09:00	26/01/2020 15:43	26/01/2020 17:35	27/01/2020 02:30	28/01/2020 08:23	28/01/2020 09:04
26/01/2020 08:38	26/01/2020 14:08	27/01/2020 08:20	26/01/2020 16:46	27/01/2020 01:05	28/01/2020 08:22	28/01/2020 08:11
6,9	3	3	3	3	3	3
8,3	8,1	19,6	2,2	1,6	3	2,1
						377
	98					
		158				
175					20	
121			101	143	620	
26/01/2020 14:33	26/01/2020 12:16	26/01/2020 20:59	26/01/2020 21:47	27/01/2020 08:27	29/01/2020 10:13	28/01/2020 21:38
26/01/2020 17:21	26/01/2020 17:58	27/01/2020 15:40	26/01/2020 19:21	27/01/2020 06:10	28/01/2020 23:27	31/01/2020 22:51
26/01/2020 17:35	26/01/2020 15:16	26/01/2020 23:59	27/01/2020 00:47	27/01/2020 11:27	29/01/2020 13:13	29/01/2020 00:38
26/01/2020 20:23	26/01/2020 23:47	27/01/2020 17:42	26/01/2020 21:07	27/01/2020 08:52	29/01/2020 01:13	31/01/2020 23:36
Norte	Sul	Sul	Norte	Norte	Norte	Sul
Sul	Sul	Sul	Norte	Sul	Norte	Sul
438	196	316	252	358	1550	754
523	230	440	155	305	905	5200

97	98	99	100	101	102	103
29/01/2020 10:13	29/01/2020 15:40	30/01/2020 05:40	30/01/2020 05:45	30/01/2020 13:31	30/01/2020 15:32	31/01/2020 06:21
29/01/2020 13:13	29/01/2020 18:40	30/01/2020 08:40	30/01/2020 08:45	30/01/2020 16:31	30/01/2020 19:02	31/01/2020 09:21
29/01/2020 13:18	29/01/2020 22:47	30/01/2020 08:40	30/01/2020 08:40	30/01/2020 15:06	31/01/2020 08:16	31/01/2020 08:28
3	3	3	3	3	3,5	3
3,1	7,1	3	2,9	1,6	16,7	2,1
		145		114		
		75		115		
232						
	71		174		39	
	264		175		271	1253
29/01/2020 20:57	30/01/2020 05:40	30/01/2020 13:30	30/01/2020 16:02	30/01/2020 20:21	31/01/2020 06:20	02/02/2020 13:33
29/01/2020 19:28	30/01/2020 11:03	30/01/2020 19:33	30/01/2020 22:21	30/01/2020 23:33	01/02/2020 11:16	01/02/2020 08:52
29/01/2020 23:57	30/01/2020 08:40	30/01/2020 16:31	30/01/2020 19:02	30/01/2020 23:21	31/01/2020 09:21	02/02/2020 16:33
29/01/2020 21:30	30/01/2020 12:33	30/01/2020 20:50	30/01/2020 23:22	31/01/2020 00:49	01/02/2020 12:40	01/02/2020 11:27
Sul	Norte	Sul	Norte	Sul	Norte	Norte
Sul	Sul	Norte	Sul	Sul	Sul	Sul
464	660	290	438	230	677	3132
370	736	653	821	507	1620	1464

104	105
31/01/2020 07:15	31/01/2020 11:30
31/01/2020 10:15	31/01/2020 15:13
01/02/2020 01:25	01/02/2020 14:51
3	3,7
18,2	27,4
	427
59	
59	
31/01/2020 12:13	01/02/2020 05:27
01/02/2020 09:53	01/02/2020 23:44
31/01/2020 15:13	02/02/2020 16:33
01/02/2020 10:42	02/02/2020 00:55
Sul	Sul
Norte	Sul
118	854
508	533