BENEFÍCIOS DA IMPLANTAÇÃO DE UM GRÁFICO ESPAÇO-TEMPO PARA O SEQUENCIAMENTO DE MANOBRAS DE NAVIOS NO CANAL DO PORTO DE SANTOS.

FELIPE FRAY BUSCHINELLI (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

felipe.fray@usp.br

RUI BOTTER (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

rcbotter@usp.br

ANA BEATRIZ MITSUTANI (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

ana.mitsu@usp.br

DANIEL DE OLIVEIRA MOTA (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

danielmota@usp.br

RESUMO

O Porto de Santos é o maior porto da América Latina, corresponde por cerca de 30% das trocas comerciais brasileiras. O estreito canal do Porto possui 30km de extensão e 63 berços distribuídos ao longo dele, porém, apenas um acesso. Considerando a extensão do canal, cada navio ocupa apenas uma parte para que possa navegar, possibilitando a formação de comboios. Em que pese ser um conceito lógico, quando se avalia a possibilidade de cruzamentos e aumento do uso eficiente do canal, requer um controle preciso, para isso o artigo propõe uma ferramenta de monitoramento que possibilite uma representação visual da ocupação setorial do canal e manobras realizadas em tempo real, demonstrando que traria grande benefício operacional e gerencial, de forma que no futuro poderia ser utilizada como base comparativa e instrumento de acompanhamento dos eventos agendados por uma ferramenta de projeção da programação das manobras.

PALAVRAS-CHAVE: Operação Portuária; Sequenciamento de navios; Gráfico tempo-espaço; AIS; Eficiência Portuária

ABSTRACT

Port of Santos is the largest port in Latin America, accounting for approximately 30% of Brazil's trade exchanges. The port's narrow channel is 30 km long and has 63 berths distributed along its length, but only one access point. Considering the channel's length, each ship occupies only a portion of it to navigate, allowing for the formation of convoys. While this is a logical concept, assessing the potential for crossings and increased efficient use of the channel requires precise control. To address this, the article proposes a monitoring tool that enables a visual representation of the sectoral occupancy of the channel and real-time maneuvers, demonstrating that it would provide significant operational and managerial benefits. In the future, it could serve as a comparative baseline and a tracking instrument for scheduled events projected by a maneuver scheduling tool.

KEYWORDS: Port operations, Ship schedulling, space-time graph, AIS, Port Efficiency

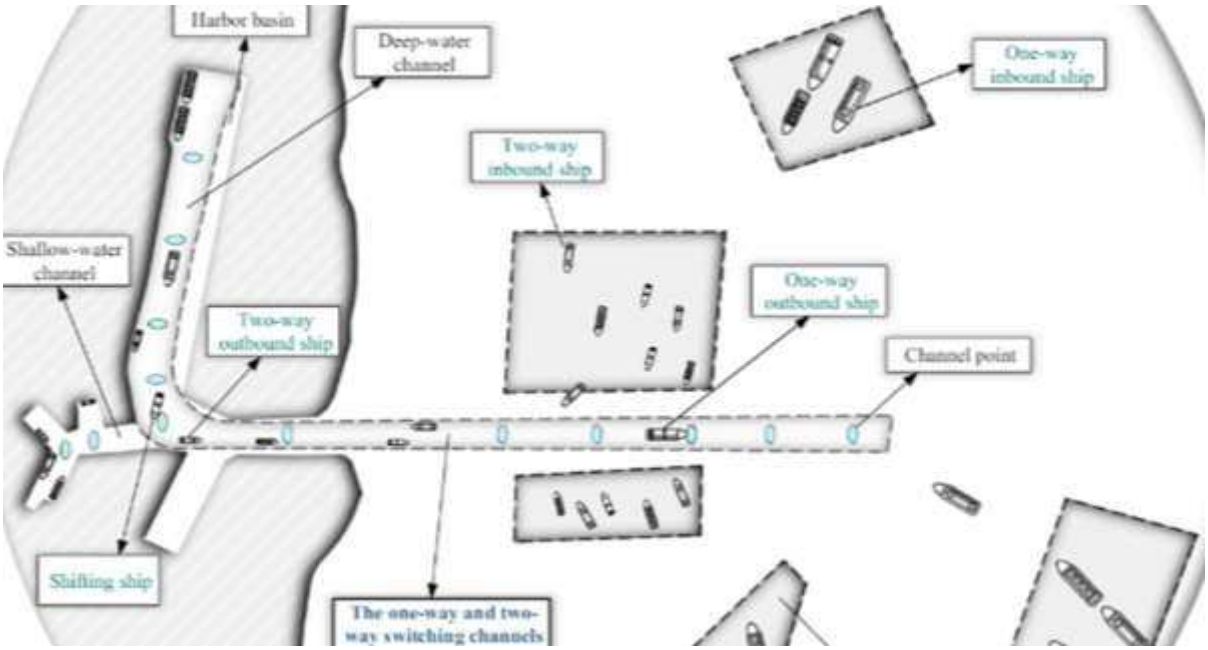
1 INTRODUÇÃO

O Porto de Santos é o maior porto da América Latina, que operou em 2023 mais de 173 milhões de toneladas e corresponde por cerca de 30% das trocas comerciais brasileiras (Porto de Santos, 2024). O canal do Porto de Santos possui 30km de extensão e 60 berços distribuídos ao longo dele, porém, apenas um acesso. Considerando a extensão do canal, cada navio aloca apenas uma parte dele para que possa navegar, possibilitando a ocupação múltipla e simultânea do canal com a formação de comboios, por exemplo, de modo que cada trecho seja considerado uma partição (Mota 2016). Quando se avalia a possibilidade de cruzamentos e aumento do uso eficiente do canal, que podemos considerar uma infraestrutura divisível, requer uma avaliação segmentada em partes monitoráveis, para isso, o artigo propõe uma ferramenta que possibilite uma representação visual da ocupação setorial do canal e manobras realizadas em tempo real, demonstrando que traria grande benefício operacional e gerencial, de forma que no futuro poderia ser utilizada como base comparativa e instrumento de monitoramento dos eventos programados por uma ferramenta de otimização das manobras.

O comércio global marítimo atingiu em 2018 11 bilhões de toneladas e vinha apresentando um crescimento acelerado (UNCTAD, 2019). Apesar da previsão em 2019 ser de um aumento de 3,5% anualmente entre 2019 e 2024, o relatório mais recente (UNCTAD, 2023) demonstrou que a pandemia teve um efeito adverso nas movimentações, contudo, passadas as restrições a indústria prevê uma retomada ascendente da quantidade de transporte de cargas em toneladas da ordem de 3% entre os anos de 2024 e 2028.

O aumento de demanda tem como consequência o congestionamento em portos movimentados, cuja quantidade de berços e dimensões do canal são limitadas segundo Liu et. al (2021). Uma solução exequível, porém, custosa e demorada, seria a expansão da atual infraestrutura, o que torna essencial o aumento de eficiência empregando a infraestrutura existente.

Há múltiplos canais com sistemática de navegação similar (fundeadouros, canal, berço), onde quando do tráfego de navios de maior porte não pode haver cruzamentos, limitação essa não imposta a dois navios de pequeno porte, que podem se cruzar, contudo, esse uso traz complicações operacionais, tais como necessidade de manutenção de distância segura entre navios de um comboio (um atras do outro) e liberação do canal para a navegação do navio de maior porte. Um exemplo de porto com esse modelo é o de Jingtang no norte da China, onde a congestão é classificada como severa por Liu et. al (2021), devido a tempos de espera para manobrar frequentemente ultrapassarem 4 horas nos períodos de pico.



Fonte: Liu et. Al (2021)

Este artigo visa demonstrar a importância e utilidade para o Porto de Santos da geração real-time de um gráfico de espaço-tempo por meio de uso de AIS para que possa futuramente ser utilizado para acompanhamento do plano de navegação de navios proveniente de uma programação matemática do planejamento de atracação e programação de navios.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Há diferentes maneiras de se modelar matematicamente as condições físicas, operacionais e regras de negócio de um porto, de modo que diferentes autores buscam simplificar a realidade com ferramentas distintas, como Mota (2016), que utilizou Job-Shop, e Li (2019) e Liu et. al (2021), que utilizaram MILP (Mixed Integer Linear Programing), o primeiro trabalho aliado a RCG (Row Column Generation) e o último aliado a CG (Column Generation), ambos para agilizar o tempo de processamento.

Alguns trabalhos foram desenvolvidos no passado por diferentes autores, contudo, empregando estratégias menos representativas da realidade como a de Xu (2018), que admitiu tempos de manobras fixos e ignorou distâncias de segurança entre navios. O estudo de Corry and Bierwirth (2019), mais sofisticado, integrou BAP (Berth Allocation Problem) e SSP (Ship Schedulling Problem), criou um modelo MILP aliado a dois algorítimos heurísticos, porém, a padronização de trajetos ignorou trajetos de

confluência dos diferentes pontos de fundeio possíveis e possibilidade das manobras de mudança de um berço para outro.

Segundo Liu et. al (2021), geralmente o planejamento portuário para manobras é feito para as próximas 24 horas, à medida que os eventos previstos se confirmam, buscando minimizar a somatória dos tempos de espera das embarcações, cada qual com um peso atribuído, o que possibilita uma análise multicritério, sob a forma da qual pode haver pesos distintos por classe de navios ou importância da carga para o porto, por exemplo.

Liu et. al (2021) comparou ainda os próprios resultados com os de Li (2019) e com estratégias reais de sequenciamento de navios no canal empregadas pela Autoridade Portuária à época de seu estudo, em 2021, no porto de Jingtang, China, os quais são FCFS (First Come First Serve), HDS (Hierarchical decision strategy) e uma estratégia gulosa de períodos fixos, durante os quais o fluxo de entrada e saída de navios se alternava de maneira fixa, ou seja, 2 horas de entradas e duas horas de saídas. A comparação de valores aponta para uma superioridade de eficiência de resultado do método proposto em relação às estratégias reais.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O Porto de Santos é constituído por múltiplos fundeadouros externos, conectados ao porto por um único canal com trechos de cruzamento restrito, cada qual com uma regra operacional diferenciada. Em fevereiro de 2022 no Porto de Santos foi homologada a navegação para navios de 366m de LOA (Lenght Over All) que devem navegar internamente com velocidade de até 7 nós, diferentemente dos demais navios, que segundo a NPCP (2024) podem atingir até 9 nós nos mesmos trechos.

Uma consonância nos estudos debatidos, independentemente do modelo matemático empregado, é a necessidade de subdivisão física do canal em trechos, de forma a representar adequadamente a geometria física e condições operacionais de cruzamento, possibilitando a representação de trechos nos quais navios podem ou não se cruzar, bem como indicar a qual subtrecho cada um dos berços está ligado. O estudo mais recente de Liu et. al (2021) prevê também a inserção de trechos virtuais entre os físicos para aumento de representatividade operacional.

O canal do Porto de Santos possui aproximadamente 30km no total, que contempla toda a extensão dragada do canal, desde o ponto mais próximo da área de fundeio (0,0km) até o terminal mais adentro do porto, para o qual a navegação leva mais tempo (29,8km), porém, a presença do navio ainda em navegação no trecho final do canal não compromete a utilização do trecho inicial do canal, mesmo que no sentido contrário.

Sendo assim, para uma primeira abordagem, a cada 100m do eixo do canal de navegação foi demarcada uma coordenada geográfica (X,Y), de forma que somadas são 298 coordenadas. Cada ponto do canal será posteriormente atribuído a um trecho

denominado para que o sequenciamento matemático possa ser realizado, buscando a ocupação adequada dessa infraestrutura, buscando equilíbrio do binômio eficiência/segurança.

Segundo a IMO (2015), o AIS é um equipamento obrigatório para navios cargueiros, que transmite informações estáticas, dinâmicas e relacionadas à viagem do navio. As informações dinâmicas são transmitidas automaticamente e contemplam, dentre outras, a posição, hora (UTC) e status de navegação, que são suficientes para identificar um navio em navegação no canal.

A tradução das coordenadas geográficas para o eixo Y empregará um algorítimo KDTREE. Segundo Filipiak et. Al (2020), através de mineração de dados do AIS, o algorítmo de KDTREE pode ser utilizado para compreender as características de fluxo de tráfego de navios, que no caso em questão atribuirá a coordenada (X,Y) do navio em navegação ao ponto mais próximo dentre os 300 previamente mencionados ao longo da extensão do canal a cada tempo.

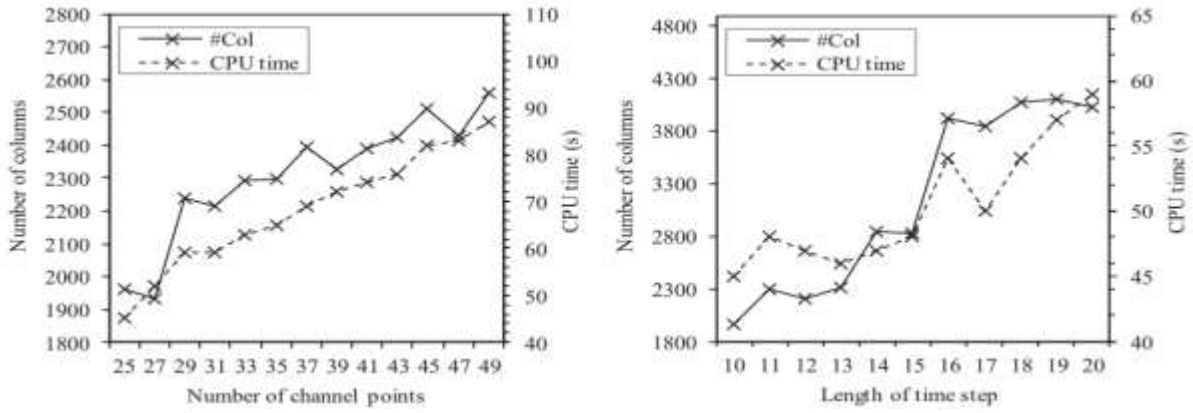
Definida a e escala e variável Y do nosso gráfico espaço-tempo, resta definir a escala de tempo a ser empregada no eixo X. Para isso faz-se necessário considerar os limitantes mínimos e máximos.

O limitante mínimo para a escala do tempo seria a recepção das informações do AIS, que de acordo com a IMO (2015) são enviadas pelos navios em condição de navegação até 14 nós com alternância de rumo a cada 10 segundos, enquanto aqueles atracados ou fundeados o fazem a cada 180 segundos, conforme tabela abaixo.

Type of ship	General reporting interval
Ship at anchor or moored and not moving faster than 3 knots	3 min
Ship at anchor or moored and moving faster than 3 knots	10 s
Ship 0-14 knots	10 s
Ship 0-14 knots and changing course	3 1/3 s
Ship 14-23 knots	6 s
Ship 14-23 knots and changing course	2 s
Ship >23 knots	2 s
Ship >23 knots and changing course	2 s

Fig 2. Fonte: IMO (2015)

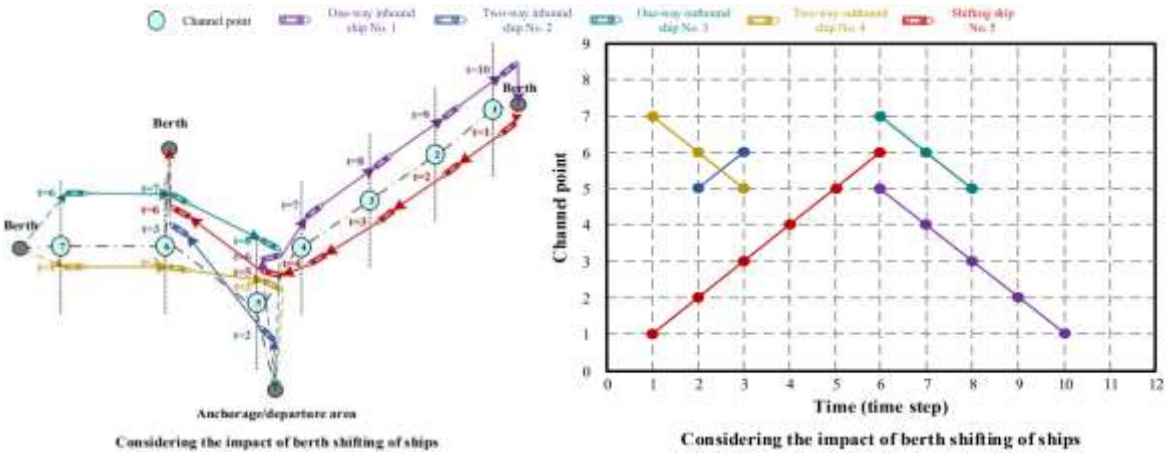
No caso do limitante máximo encontramos uma diferenciação em relação ao cálculo matemático, no qual os autores representam o tempo como sendo o intervalo mínimo de tempo que se traduz em uma distância de segurança entre navios em uma mesma rota e sentido, de forma a preservar a segurança física do sistema, sem desperdiçar capacidade de processamento de máquinas, uma vez que cada intervalo de tempo adicional gera maior necessidade de processamento.



Fonte : Liu et. al (2021)

Segundo a análise de sensibilidade apresentada por Liu et. al (2021), que empregou o intervalo dentre tempos de 10 minutos por se tratar do tempo proporcional à distância de segurança entre navios no porto de Jigtang na China, o aumento do intervalo de 10 minutos incorreria em acréscimo de colunas de cálculo e de tempo computacional, especialmente quando supera os 15 minutos para o caso em questão, pois à medida que intervalo aumenta, eleva-se também a quantidade de possibilidades de manobras simultâneas, resultando em maior potencial de encontro de navios e, portanto, de complexidade do problema.

Dessa forma, com o intuito de possibilitar uma maior precisão da representação dos acontecimentos reais, será empregado o monitoramento da posição com o menor espaçamento entre dados recebidos, o que possibilitará também futuramente controlar o quão aderente a posição do navio estará dentro do subtrecho programado do canal para ser ocupado. Liu et. al (2021). demonstra a aplicação do gráfico espaço tempo considerando 10 subtrechos do canal (0-9) e o tempo em time steps, posteriormente no artigo definido em 10 minutos.



Fonte: Liu et. al (2021)

3.1 Modelo Gráfico

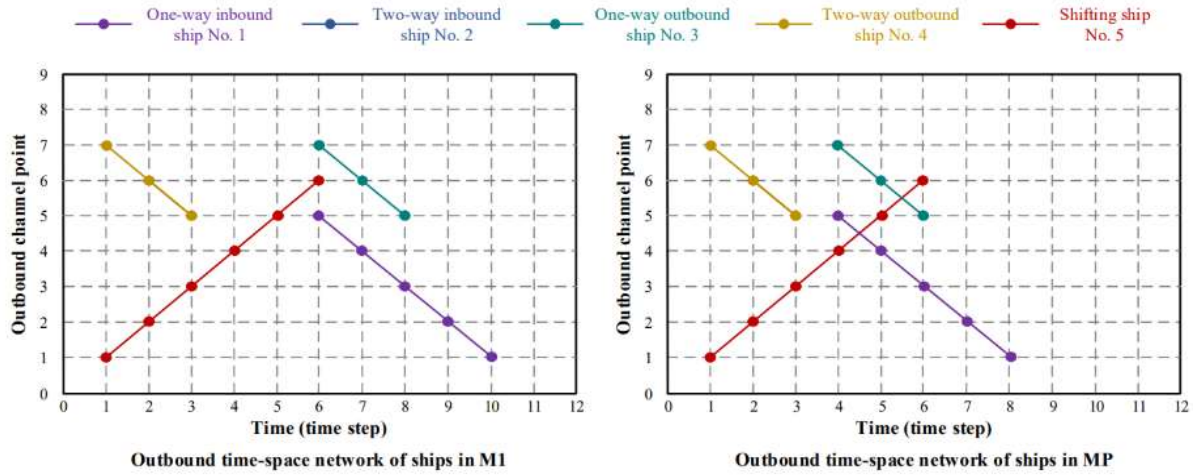
O gráfico poderá representar visualmente o porto, possibilitando alguns benefícios de monitoramento de cunho visual e comparativo a partir do seu emprego:

Velocidade: Inclinação da linha de representação dos navios possibilitará acompanhar a velocidade do seu deslocamento ao longo do canal, sendo uma linha mais íngreme correspondente a um navio que se moveu mais rápido;

Visão gerencial: Espaços vazios no canal poderão ser visualizados e, mesmo sem uma ferramenta de otimização, compreender possíveis oportunidades de ocupação;

Atracação/Desatracação: As atracações poderão ser monitoradas pela desaceleração dos navios nos subtrechos do canal aos quais estão ligados cada um dos berços, observáveis pela linha menos íngreme;

Cruzamento: O local e momento do cruzamento de dois navios poderão ser identificados no gráfico, possibilitando à Autoridade Portuária a coordenação da manobra para garantir que o cruzamento ocorra nos trechos previstos, como apresentado por Liu et. al (2021) na imagem da direita, abaixo:



Fonte: Liu et. al (2021)

A Autoridade Marítima determina, por meio da NPCP (2024) e portaria 100/2023 (2023), especificamente nos artigos 20 ao 23 as condições, limitações e restrições de cruzamento para navios no Porto de Santos, a depender da carga embarcada, porte, calado e operacionalidade. Em vermelho e laranja estão indicadas as regiões que a portaria determina como cruzamentos proibido e restrito, respectivamente. Em verde encontra-se a região sem curvaturas com maior largura do trecho interno do canal,

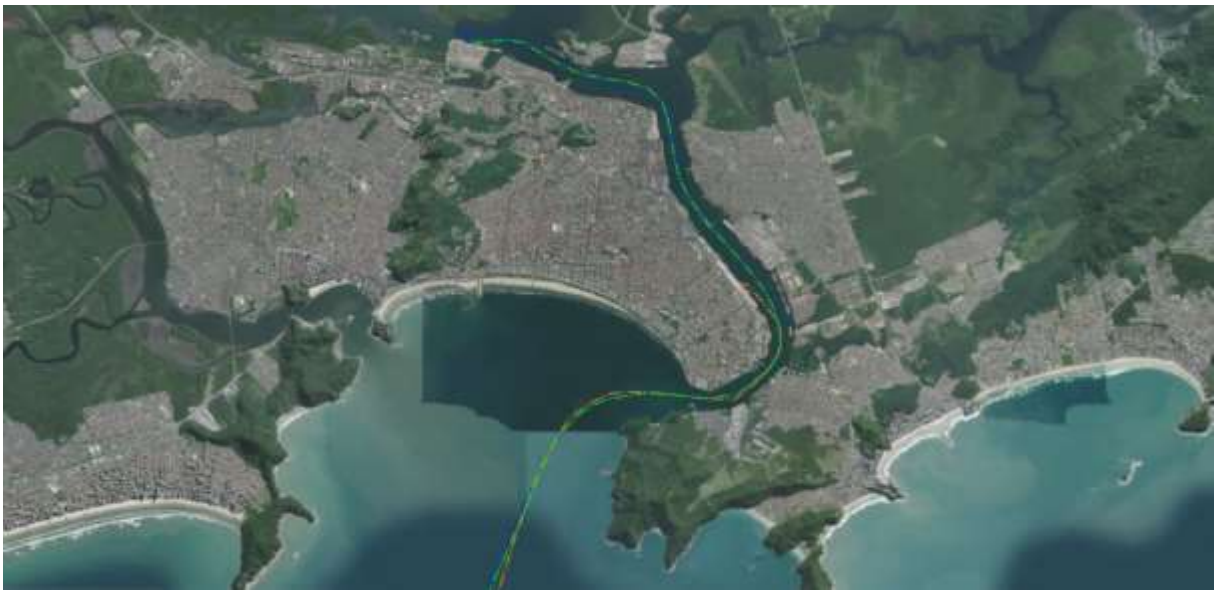
considerada pelo autor, dentre as demais permitidas, uma região ideal para cruzamentos na porção interna do canal.



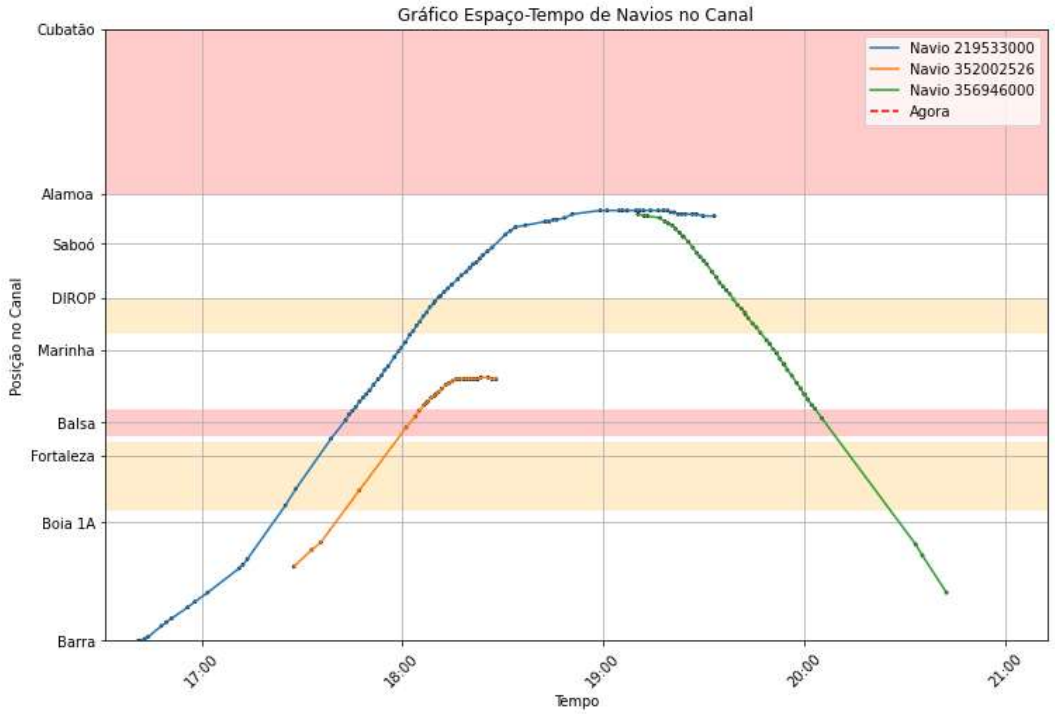
Fonte: Autor (2024)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A representação visual abaixo retrata um período de 4 horas do canal do dia 14/05/2024, foram filtrados os dados para representar a navegação de 3 navios para os quais apresentavam-se dados mais relevantes, que possibilita a identificação de acordo com o esperado. Em que pese alguns dados de AIS terem apresentado falha na recepção, a geração do gráfico possibilitou o acompanhamento das trajetórias dos navios. No gráfico resta clara a manobra de “um pelo outro” entre navios na BTP, além do pequeno comboio criado pela entrada de outro navio com manobra que se encerrou no berço 34 (entre marinha e a balsa). Abaixo encontram-se o tracking das 3 manobras e o gráfico gerado por elas, indicando também o número MMSI de cada navio.



Fonte: Autor (2024)



Fonte: Autor (2024)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A consciência situacional do Porto é um tema recorrente dentre os intervenientes da Comunidade Portuária, buscada justamente para possibilitar uma visão gerencial que possibilite não só a eficiente operacionalização dos ativos, mas também uma visão crítica instantânea das condições operacionais portuárias. O aumento da tonelagem anual de cargas transportadas e do porte dos navios faz com que as janelas de manobras sejam reduzidas, o que aumenta a dificuldade de uma programação eficiente e segura.

Considerando o objetivo de garantir tanto a eficiência quanto a segurança, uma ferramenta de monitoramento automático e atualizado de manobras via AIS não apenas proporcionaria uma nova camada de confiabilidade à tomada de decisões na programação de navios, mas também serviria como um instrumento para verificar a aderência à programação estabelecida. Tal sistema contribuiria significativamente para otimizar a logística portuária, assegurando que as operações estejam alinhadas com os padrões planejados, além de melhorar a gestão e a coordenação das manobras navais.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Santos é homologado para receber navios de 366 metros. Disponível em: https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2021/02/santos-e-homologado-para-receber-navios-de-366-metros#:~:text=O%20Porto%20de%20Santos%20recebeu,Leste%20da%20Am%C3%A9rica%20do%20Sul. Acesso em: 12 jun. 2024.

CORRY, Paul; BIERWIRTH, Christian. The Berth Allocation Problem with Channel Restrictions. Transportation Science, INFORMS, v. 53, n. 3, p. 708-727, mai. 2019. DOI: 10.1287/trsc.2018.0865.

FILIPIAK, Dominik; WĘCEL, Krzysztof; STRÓŻYNA, Milena; MICHALAK, Michał; ABRAMOWICZ, Witold. Extracting Maritime Traffic Networks from AIS Data Using Evolutionary Algorithm. Business & Information Systems Engineering, v. 62, n. 5, p. 435–450, 2020. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s12599-020-00661-0. Acesso em: 16 nov. 2024.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). A 29/Res.1106. 2015 Disponível em: https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1106(29).pdf. Acesso em: 12 jun. 2024.

LI, Shuqin; JIA, Shuai. The seaport traffic scheduling problem: Formulations and a column-row generation algorithm. Transportation Research Part B: Methodological, v. 128, p. 158-184, 2019.

LIU, Baoli et al. Short-term berth planning and ship scheduling for a busy seaport with channel restrictions. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, v. 154, 2021. DOI: 10.1016/j.tre.2021.102467. Acesso em: 13 jun. 2024.

MARINHA DO BRASIL. NPCP 2024 CPSP. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/cpsp/sites/www.marinha.mil.br.cpsp/files/upload/NPCP2024_CPSP.pdf. Acesso em: 12 jun. 2024.

MARINHA DO BRASIL. Portaria 100/2023. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/cpsp/sites/www.marinha.mil.br.cpsp/files/Port%20100_2023.pdf. Acesso em: 12 jun. 2024.

MOTA, Daniel de Oliveira. Modelagem da programação de navios para otimização no canal de acesso ao porto de Santos. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Naval e Oceânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. DOI: 10.11606/T.3.2016.tde-06102016-085515. Acesso em: 15 jun. 2024.

PORTO DE SANTOS. Fatos e Dados 2023. Disponível em: https://www.portodesantos.com.br/wp-content/uploads/Fatos-e-Dados-2023-FF.pdf. Acesso em: 12 jun. 2024.

PORTO DE SANTOS. Relatório 4T2023. Disponível em: https://www.portodesantos.com.br/wp-content/uploads/Relatorio-4T2023-1.pdf. Acesso em: 12 jun. 2024.

UNCTAD. Review of maritime transport 2019. United Nations Conference on Trade and Development, 2019.

UNCTAD. Review of maritime transport 2023. United Nations Conference on Trade and Development, 2023.

XU, Ya; XUE, Kelei; DU, Yuquan. Berth scheduling problem considering traffic limitations in the navigation channel. Sustainability, v. 10, n. 12, p. 4795, 2018.

ZHENG, B.; CHEN, J.; XIA, S.; JIN, Y. Data Analysis of Vessel Traffic Flow Using Clustering Algorithms. In: International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2008, Changsha, China. Proceedings […]. Changsha, 2008. p. 243-246. DOI: 10.1109/ICICTA.2008.127.