ARGONÁUTICA ENGENHARIA E PESQUISAS

CELSE CENTRAIS ELETRICAS DE SERGIPE

GOLAR POWER

TERMINAL MARÍTIMO FLUTUANTE DE GNL COM ANCORAGEM YOKE E SISTEMA MEDUSA PARA PLANEJAMENTO E CONTROLE DAS OPERAÇÕES: SOLUÇÃO DE GRANDE SEGURANÇA E BAIXO IMPACTO AMBIENTAL

Trabalho submetido ao Prêmio ANTAQ 2019 na categoria Iniciativas Inovadoras

São Paulo

Outubro de 2019

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO-PROBLEMA 1

2 OS OBJETIVOS DA INICIATIVA 5

3 O PÚBLICO-ALVO 7

4 A DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DA PRÁTICA INOVADORA 8

5 A SITUAÇÃO HOJE, RESULTADOS E/OU IMPACTOS DA INICIATIVA 28

6 PARCERIAS 30

7 PARTICIPAÇÃO DOS USUÁRIOS OU DA SOCIEDADE EM GERAL 32

8 GRAU DE REPLICABILIDADE 32

9 AS PRINCIPAIS BARREIRAS ENCONTRADAS NO DESENVOLVIMENTO DA PRÁTICA INOVADORA E COMO FORAM SUPERADAS 33

10 OS FATORES QUE CONTRIBUÍRAM PARA O SUCESSO DA PRÁTICA INOVADORA INSCRITA 35

11 REFERÊNCIAS 36

1 INTRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA SITUAÇÃO-PROBLEMA

A matriz elétrica brasileira é composta majoritariamente de fontes renováveis. A fonte hidrelétrica representa mais de 60% da geração de energia no país, com as fontes nuclear, eólica e solar em relevante crescimento nos últimos anos.

O histórico brasileiro demonstra que a sazonalidade e longos períodos de seca podem acarretar desabastecimentos de energia, gerando prejuízos e instabilidade que se espraia por toda a economia do país, por exemplo, a “Crise do Apagão” nos anos 2000.

As usinas termelétricas são uma boa alternativa para manter o sistema elétrico do país em equilíbrio, atuando como *backup* em situações de seca prolongada. Anteriormente abastecidas por carvão mineral e óleo diesel, essas usinas se modernizaram com o emprego de turbinas a gás, atingindo padrões aceitáveis de emissão de poluentes, impacto ambiental e de eficiência, além de se tornar referência de uso na Europa e EUA.

Nos últimos anos, algumas iniciativas do governo brasileiro vêm sendo tomadas com base numa visão de futuro em que o gás natural será necessário e importante para o desenvolvimento do país. Por exemplo, o programa Gás para Crescer, impulsionado pelo Ministério de Minas e Energia, foi lançado com o objetivo de estudar e propor medidas que melhorem a harmonização entre os setores de energia elétrica e gás natural no sentido de equilibrar a alocação dos riscos de cada um. Entre elas, se propõe a possibilidade de acesso de terceiros à terminais de gás natural liquefeito (GNL) anteriormente dominados pela Petrobrás. Mais recentemente, foi lançado o programa Novo Mercado de Gás cujas diretrizes irão promover a abertura completa do setor de gás natural e a quebra do domínio quase que exclusivo da Petrobrás no setor. A exploração de petróleo na camada pré-sal produz grande quantidade de gás associado, que pode ser beneficiado para gás natural aumentando a disponibilidade desse recurso energético e reduzindo e eliminando a dependência do gás importado da Bolívia.

A empresa Centrais Elétricas de Sergipe S.A – CELSE S.A, cujos acionistas são a EBRASIL Energia Ltda e a GOLAR POWER S.A. foi vencedora do 21º Leilão

de Energia Nova se tornando responsável pela implantação da UTE Porto de Sergipe I, localizada em Barra dos Coqueiros, na região Metropolitana de Aracaju, Sergipe. Com investimentos da ordem de R$6 bilhões a usina foi projetada para suprir 15% da demanda de energia do Nordeste.

Em busca de flexibilidade na seleção de fornecedores do gás natural, que torna o custo de produção de energia mais competitivo, foi escolhida a importação de gás na forma líquida (GNL) por navios denominados LNGCs (*Liquid Natural Gas Carrier*), o que exigiria a construção de um complexo terminal portuário num local com pouca infraestrutura de apoio, existindo somente o Terminal Marítimo Inácio Barbosa (TMIB) nas imediações. O local ideal para instalação do terminal seria uma região naturalmente abrigada, por exemplo uma baía, como é o caso dos terminais de gás no interior da Baía da Guanabara (RJ) e Baía de Todos os Santos (BA). No entanto, a geografia local não criou locais tão privilegiados como esses no litoral do Sergipe, existindo somente locais em mar aberto exposto a condições de mar adversas.

Tradicionalmente, a forma comum de lidar com o problema de exposição às ondas do mar, seria a construção de um quebra-mar que protegesse o terminal e possibilitasse sua operação de forma segura (ex: Porto de Pecém, Porto de Açu etc), com poucas interrupções em razão da influência de agentes climáticos. Devido à relação exponencial entre o custo de construção deste tipo de estrutura e a profundidade do local, o terminal teria que ser construído uma região próxima da costa sob pena da inviabilidade econômica do empreendimento. Porém, isso implicaria na limitação dos calados dos navios e, consequentemente, a necessidade de realização de campanhas de dragagens para aprofundamento e manutenção.

Além do aspecto financeiro da realização desse empreendimento, o impacto ambiental na região seria bastante elevado, alterando esse sensível ecossistema entre os rios Sergipe e São Francisco. A realização de dragagens e a construção de um quebra-mar na região implicariam na modificação da dinâmica das correntes e transporte de sedimentos da região, o que certamente ampliariam os efeitos de alteração da linha de costa, como engordamento da praia, conforme já verificado devido a presença do Terminal Marítimo Inácio Barbosa (TMIB), ver Figura 1.

Figura 1 – Processo de engordamento da linha de costa devido a presença do Terminal Marítimo Inácio Barbosa – TMIB

Com intuito de sobrepor essas limitações, diversas alternativas foram estudadas, incluindo quebra-mares flutuantes, soluções estas menos impactantes em termos ambientais e mais baratas para grandes distâncias da costa e profundidades. No entanto, extensos estudos meteoceanográficos, ensaios em escala reduzida e simulações computacionais indicaram que seria possível manter uma unidade do tipo FSRU (*Floating Storage Regasification Unit*) ancorada em mar aberto, desde que o sistema de ancoragem fosse corretamente projetado.

Adicionalmente, os estudos indicaram que seria viável, sob condições ambientais controladas, realizar o transbordo do gás natural líquido para a unidade FSRU através de uma operação denominada *Ship-to-Ship* (STS), na qual os navios são posicionados a contra bordo e conectados por dutos específicos que realizam a transferência da carga. Devido à complexidade da operação e a própria natureza perigosa da carga, este procedimento geralmente não é realizado com GNL em embarcações expostas ao mar aberto.

Em busca de uma solução de equilíbrio conjunta para o projeto que combinasse segurança, nível de serviço, viabilidade econômica e baixo impacto ambiental, foram desenvolvidas inovações tecnológicas que contribuíram para o sucesso do empreendimento. A começar pela aplicação de um sistema de ancoragem do tipo *Submerged Soft-Yoke*, ilustrado na Figura 2, que é constituído por uma base fixa no leito marinho, com uma estrutura giratória submersa ao qual a FSRU é conectada por

um dispositivo instalado em sua proa, permitindo que a embarcação gire livremente ao sabor da direção de incidência dos principais agentes ambientais atuantes (vento, corrente e onda), evitando assim esforços excessivos.

Utilizado pela primeira vez no Brasil, esse sistema permite a conexão do gasoduto a FSRU por meio de um tubo flexível, conectando o terminal de GNL à termelétrica. Essa estrutura física tem dimensões bastante reduzidas, baixo impacto ambiental e tempo de construção menores quando comparada a construção de um terminal. O sistema de ancoragem também possui um mecanismo especificamente projetado para compensação/redução das cargas induzidas pelos movimentos do navio no gasoduto, algo completamente customizado para as condições meteoceanográficas do litoral do Sergipe.

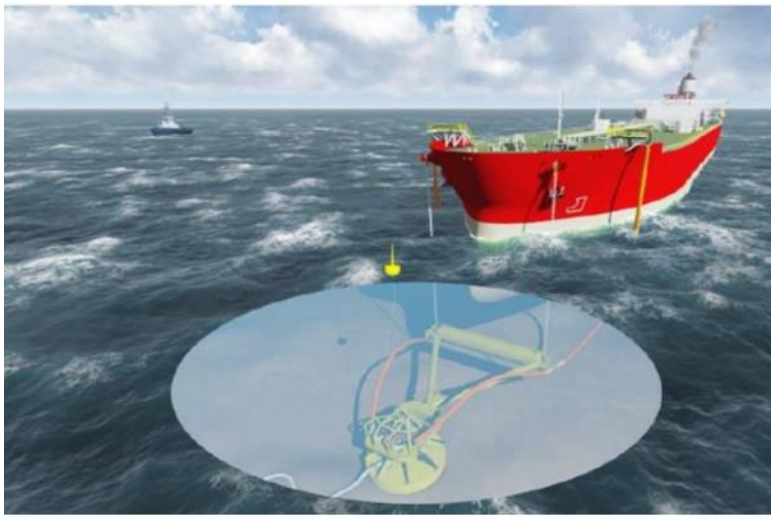

Figura 2 – Sistema de ancoragem Yoke

Uma vez que a FSRU é exposta a mar aberto, as janelas de operação de transferência devem ser definidas de forma bastante assertiva desde a chegada do navio ao fundeadouro. Para que a transferência ocorra de forma segura, os cabos de amarração que conectam os navios, assim como as defensas pneumáticas que os impedem de colidir e os movimentos do *manifold* de transferência devem ser precisamente calculados, visando a mantê-los dentro de seus limites de projeto. O problema se torna ainda mais complexo porque a transferência dura mais de 24h, sendo necessário prever as cargas nesses componentes de acordo com as mudanças das condições climáticas locais (onda, vento, corrente e maré), evitando o início de

operações cujas janelas não sejam seguras até o final. Além disso, os rebocadores devem ser capazes de atuar de forma eficiente na manobra para que os navios se conectem em segurança, sendo essas embarcações de apoio bastante sensíveis ao estado de mar, em alguns casos com eficiência inferior a 10% em condições adversas. Se não bastasse isso, as rotações da FSRU ao redor do Yoke devem ser previstas de forma acurada para orientar o navio LNGC durante a aproximação, assim como os limites para embarque e desembarque de prático devem ser observados.

Visando a gerenciar todas essas etapas da operação, integrou-se ao projeto um sistema inovador, denominado MeDuSa® (*Mooring Design System* - INPI Nº BR512016001714-7), um sistema que realiza simulações computacionais no estado-da-arte das diversas etapas da operação, prevendo o comportamento do sistema durante toda a operação. O sistema é alimentado por dados de sensores instalados na FSRU e no ambiente, que coletam dados em tempo real, permitindo a autocalibração do sistema e maior assertividade nos cálculos realizados.

A aplicação dessas práticas inovadoras põe em funcionamento um conjunto de medidas que levam a operação ao nível 4.0, combinando o uso de equipamentos no estado-da-arte, dados monitorados em tempo real e modelos computacionais, permitindo que o terminal seja operado no mais alto padrão de segurança e eficiência, mantendo-se o compromisso de preservação do meio ambiente.

Neste documento são apresentados os objetivos dessas iniciativas, as etapas dos desenvolvimentos, os resultados alcançados até o momento e a continuidade dos desenvolvimentos. Deve-se destacar que com a evolução do terminal o objetivo é a futura integração com a previsão de despacho/demanda da térmica, permitindo uma operação cada vez mais eficiente.

2 OS OBJETIVOS DA INICIATIVA

O objetivo dessa iniciativa foi desenvolver uma solução para o complexo termelétrico comprometido com o meio ambiente e que, com o uso de recursos tecnológicos, viabilizassem o primeiro terminal marítimo de regaseificação de GNL na costa do Brasil que dispensa realização de extensas campanhas de dragagem de

aprofundamento e da construção de quebra-mares, mesmo estando exposto à incidência de ondas, algo inédito no Brasil.

Para tal, o projeto reuniu uma usina termelétrica a gás natural equipada com turbinas de última geração, uma FSRU customizada para receber um sistema de ancoragem moderno e um sistema de gerenciamento das operações, que simula a operação de transbordo de carga como um todo, desde o embarque seguro do prático no LNGC e manobra de aproximação com a FSRU, até a eficiência de atuação dos rebocadores em mar aberto, a integridade dos cabos de amarração durante a transferência de carga e a manobra de desconexão.

O resumo dos objetivos do desenvolvimento pode ser visto abaixo:

- Construir o primeiro terminal flutuante de regaseificação (FSRU) em local desabrigado na costa brasileira, isto é, exposto a ondas, corrente, vento e maré para recebimento de gás natural através de operação de transferência Ship-to-Ship. Dessa forma, o tempo de implantação e impacto ambiental são reduzidos, não necessitando da construção de um complexo quebramar ou realização de dragagens/derrocagens de implantação/manutenção;
- Desenvolver um sistema de ancoragem complacente (*Soft Yoke*), customizado para as condições do litoral de Sergipe e capaz de permitir que a FSRU possa se manter ancorada durante um período de 25 anos sujeito às condições ambientais atuantes no local;
- Disponibilizar uma ferramenta tecnológica e inovadora para as atividades de planejamento do terminal, integrando dados meteoceanográficos, dados sensores de movimento da FSRU e o simulador computacional MeDuSa® da operação da FSRU para construção da réplica digital da operação de transbordo em ship-to-ship. Aplicação da ferramenta de simulação de todo o processo de manobra, aproximação, eficiência da atuação de rebocadores, transferência de gás, cargas no sistema de amarração e manifold de conexão, desatracação segura e partida dos navios LNGCs, considerando as especificidades/características de cada navio para previsão da operação. Fornecimento das janelas operacionais ótimas para o terminal, contribuindo assim para a operação segura e eficiente do terminal;

- Criação do acervo digital do terminal (*big data*) para extração de estatísticas, padrões (*clustering*) e aplicação de algoritmos de inteligência artificial (redes neurais artificiais) para aprimoramento contínuo das operações, assim como identificação de gargalos e pontos de melhoria.
- Monitorar e fornecer dados ambientais às universidades brasileiras, públicas e privadas, a fim de colaborar com as pesquisas científicas no local, no que se refere ao comportamento hidrodinâmico da região. Esses dados permitem que a comunidade científica possa aprimorar o conhecimento sobre o ambiente da região, que é bastante carente de dados medidos. Essas informações podem auxiliar desde futuros empreendimentos na região, que trazem desenvolvimento da economia local, até um melhor entendimento sobre a dinâmica das praias da região e mudanças climáticas.

3 O PÚBLICO-ALVO

Devido à sua multidisciplinaridade, o projeto desenvolvido possui diversos públicos-alvo (interessados e beneficiários), sendo os mais importantes:

1) Sociedade: que se beneficia da diversificação da geração de energia elétrica na região Nordeste, que atualmente é bastante depende de recursos hídricos numa região de longos períodos de estiagem, contando ainda com um projeto comprometido com a segurança e eficiência das operações e, principalmente, com a preservação do meio ambiente. A sociedade também se beneficia com a geração direta e indireta de empregos numa região com grande potencial de desenvolvimento.
2) UTE Porto de Sergipe: que realizará suas operações de maneira segura e eficiente, contando com a utilização de um sistema de planejamento das janelas de operação para garantir o abastecimento da usina e, portanto, o fornecimento de energia elétrica para toda a região quando requerido. Além disso, os dados armazenados auxiliam no planejamento de futuras expansões do terminal, reduzindo os custos de implantação/manutenção pelo maior conhecimento produzido;
3) Autoridade Marítima e Praticagem: que se beneficiam do sistema para garantir a segurança da navegação na região e preservação do meio ambiente;

4) Universidades e órgãos ambientais: interessados nos dados ambientais coletados para estudos de longo prazo e monitoramento da região costeira do estado de Sergipe. Além disso, contam com o possível uso dos dados ambientais para emissão de alertas de possíveis ressacas e poluição marinha.

4 A DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DA PRÁTICA INOVADORA

A empresa Centrais Elétricas de Sergipe S.A – CELSE participou do 21º Leilão de Energia Nova A-5, em abril de 2015, se consagrando vitoriosa do processo para construção de um complexo termelétrico e fornecimento de energia para diversas distribuidoras do país num período de vigência de 25 anos.

O complexo está localizado no município de Barra dos Coqueiros, estado de Sergipe, a apenas 20 km da capital Aracaju, sendo composto pela usina termelétrica UTE Porto Sergipe I, uma linha de transmissão de 500 kV e extensão de 33 km, por instalações offshore que incluem uma unidade de regaseificação de GNL - FSRU, um gasoduto, uma adutora e um emissário de efluentes. A Figura 3 apresenta a localização do projeto, tendo como ponto de referência sua proximidade ao Terminal Marítimo Inácio Barbosa (TMIB), atualmente em funcionamento na operação de cargas de granéis sólidos, líquidos, grãos e de suporte à operação offshore

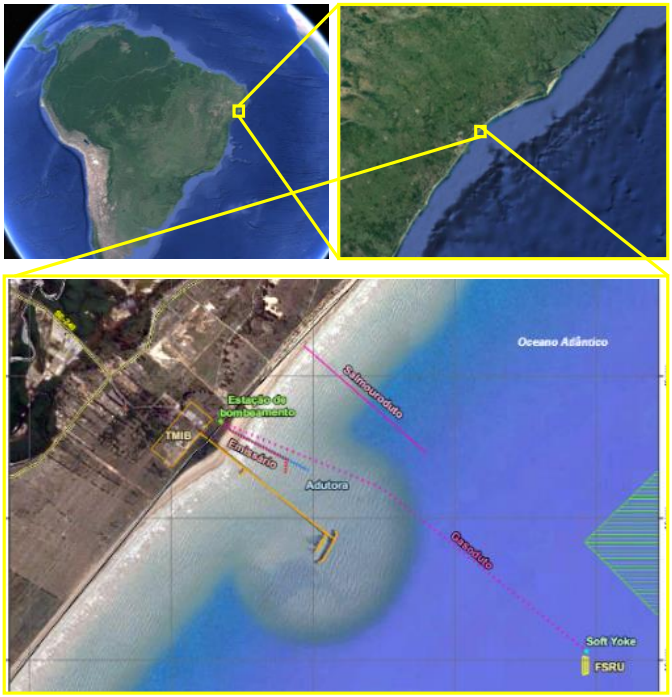

Figura 3 – Localização do Complexo Termelétrico Barra dos Coqueiros

A termelétrica foi concebida para gerar energia elétrica a partir da queima de gás natural, uma solução mais eficaz, menos poluente e que pode emitir até 90% menos CO2 que o óleo diesel e o carvão. Além disso, a usina está equipada com turbinas com tecnologia de Ciclo Combinado, o que resulta numa eficiência nominal de aproximadamente 60% da energia potencial do gás. A energia elétrica gerada pode atender 15% de toda demanda de energia na Região Nordeste do país, sendo conectada ao Sistema Interligado Nacional – SIN – pela linha de transmissão do complexo.

Conforme mencionado, a UTE Porto Sergipe I será abastecida com gás natural proveniente do exterior e armazenado numa unidade flutuante de regaseificação, o FSRU Golar Nanook, sendo que o transporte até a região será realizado por navios de gás natural liquefeito (LNGC). Após a chegada do navio, um prático habilitado da região sobe a bordo do navio e realiza a manobra, com auxílio de rebocadores, até o local de posicionamento do FSRU. Neste momento, as embarcações são conectadas por cabos de amarração de diâmetro e material específicos, seguindo um arranjo pré-determinado, no qual as embarcações são dispostas em configuração *Ship-to-Ship* (STS). Uma vez que as embarcações estejam amarradas de maneira segura, os dutos de transferências de GNL também são conectados, iniciando o processo de abastecimento da unidade FSRU com GNL. Após o término da transferência, todo o processo de conexão e amarração é desfeito, sendo o navio LNGC manobrado para uma região segura e afastada do FSRU até que o prático desembarque e o navio siga viagem em segurança para seu próximo destino.

A concepção de um bom projeto de engenharia que seja capaz de atender ao objetivo principal de abastecer a termelétrica com gás natural quando demandado requer, portanto, que a unidade FSRU deva ter sempre GNL à disposição para regaseificação e despacho. No entanto, existem diversos fatores, principalmente relacionados a ações ambientais, que não são controláveis e que podem interferir em seu abastecimento. A ação de ondas geradas por tempestades no oceano (*swell*) ou por ventos locais (*sea*), combinadas aos efeitos de corrente, maré e vento durante todas as etapas que constituem a operação impõem relevantes dificuldades operacionais, pondo em risco o sucesso da operação.

O caráter inovador do processo de implantação do terminal de GNL conectado à UTE Porto de Sergipe I se deve a diversos fatores, sendo a própria concepção do terminal a primeira delas. Em sua fase inicial, diferentes alternativas locacionais e tecnológicas para sua implantação passaram por um processo decisório muito bem conduzido e baseado nos pilares técnico, econômico e ambiental, que distanciou o projeto final da prática comum. Um resumo simplificado das características de cada conceito avaliado é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Matriz de decisão simplificada do projeto UTE Porto Sergipe I. Adaptado de [1].

Alternativa	Vantagens	Desvantagens/Impactos
1 – FSRU no TMIB e gasoduto sobre a ponte de ligação	Uso de infraestrutura já existente	Necessidade de ampliação do cais e quebra-mar; Dragagem de aprofundamento e de manutenção, com lançamento dos sedimentos em bota-fora oceânico; Inviabilização das operações portuárias do TMIB; Proximidade da costa traz riscos adicionais a segurança de pessoas;
2 – FSRU em cais novo afastado da costa com quebra mar e gasoduto	Sem interferência no TMIB; Sem necessidade de dragagens de aprofundamento ou de manutenção	Construção de cais de atracação e de um quebra mar de grande porte; Instalação de um gasoduto no leito marinho Alterações potencialmente relevantes na dinâmica costeira decorrente da construção de um quebra mar extenso (> 800 m), com impacto nas praias e dinâmica hidrodinâmica da região.
3 – FSRU ancorado com sistema yoke submerso, gasoduto submarino	Sem intervenções no TMIB; Sem necessidade de dragagens de aprofundamento ou de manutenção; Sem necessidade de construção de quebramar; Sem alterações relevantes na dinâmica costeira	Instalação de um gasoduto no leito marinho Tecnologia inovadora que exigiria grandes estudos meteoceanográficos e planejamento preciso das operações;

Entre as possíveis alternativas, considerou-se a atracação permanente da unidade FSRU no cais do TMIB, ilustrado na Figura 4, de modo que as operações de transferência de GNL em arranjo STS pudessem ser realizadas sob a proteção do quebra-mar já existente e, após sua regaseificação, o combustível seria enviado para a termelétrica por um gasoduto que seria instalado na ponte de ligação também já existente do terminal. Apesar de promissora do ponto de vista de proteção contra a incidência de ondas, a implantação desta alternativa seria extremamente custosa e de grande impacto ambiental em função das campanhas de dragagem de aprofundamento para acomodar o FSRU no cais, bem como também permitir a navegação dos navios LNGCs carregados de GNL com suficiente folga sob a quilha. Além disso, a implantação de um terminal de GNL no TMIB acabaria afetando as atividades em vigência do terminal, o que impactou negativamente na matriz de decisão, além de adicionar riscos adicionais ao ser humano devido à proximidade com a costa.

Berços de atracação com a ponte de acesso

Quebra mar

Figura 4 – Terminal Marítimo Inácio Barbosa (TMIB)

Outra possibilidade considerada foi o reposicionamento do terminal para uma nova localização, na qual as operações de transbordo seriam realizadas por operações STS num cais fixo, similar ao ilustrado na Figura 5, sob a proteção de um quebra-mar à 5 km da costa, sendo que o gás seria enviado para a termelétrica por gasoduto submarino. Apesar da possível solução dispensar a realização de dragagens de aprofundamento, o conceito exigiria a construção de um quebra-mar rochoso de grande volume, devido à maior profundidade, acarretando na necessidade de investimentos vultosos numa solução de grande impacto ambiental, dado que sua

construção levaria a mudanças significativas da hidrodinâmica costeira, levando a modificações na linha de praia, como erosão e/ou assoreamento.

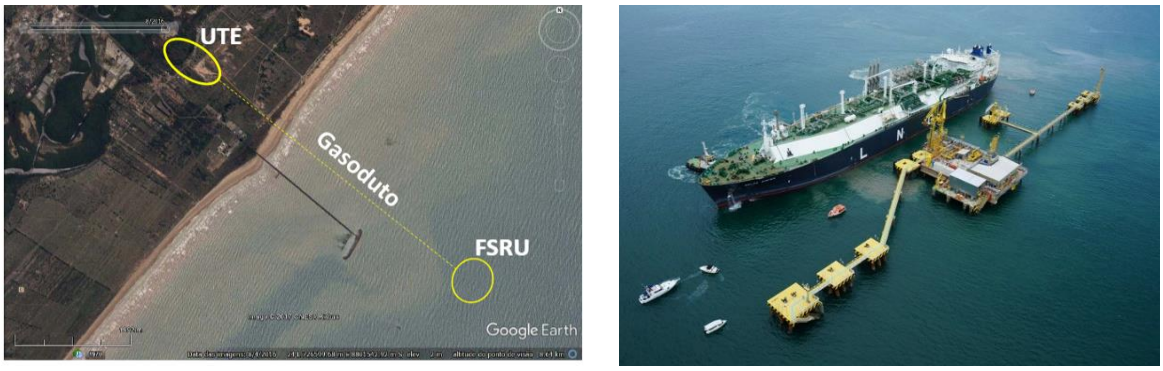

Figura 5 – Alternativa de instalação do terminal, com cais fixo, quebra-mar a 5 km da costa e gasoduto que faria a conexão do FSRU com a UTE Porto Sergipe I

Contra a adoção de conceitos tecnicamente viáveis, porém custosos e negativos do ponto de vista ambiental, recorreu-se à aplicação de soluções inovadoras e tecnológicas que viabilizassem a operação do terminal com segurança e sem a necessidade de dragagens de aprofundamento e manutenção ou a construção de quebra-mares.

A solução encontrada foi a adoção de um sistema pivotante de porte reduzido, denominado *Submerged Soft-Yoke* (SSY), ilustrado na Figura 7, que permite que a embarcação FSRU rotacione 360 graus ao sabor das condições ambientais e oscile com maior complacência de acordo com a incidência de ondas sem danificar os dutos que transferem o gás natural ao gasoduto conectado à termelétrica. O equipamento teve sua funcionalidade testada e comprovada em diversos testes realizados no laboratório Marintek, na Noruega, sendo algumas fotos ilustradas na Figura 6. Adicionalmente, a intervenção do sistema no meio ambiente marinho passou a ser bem menor, restringindo-se ao estaqueamento que fixa a base do sistema no leito do mar e ao lançamento do gasoduto, também necessário em alternativas consideradas.

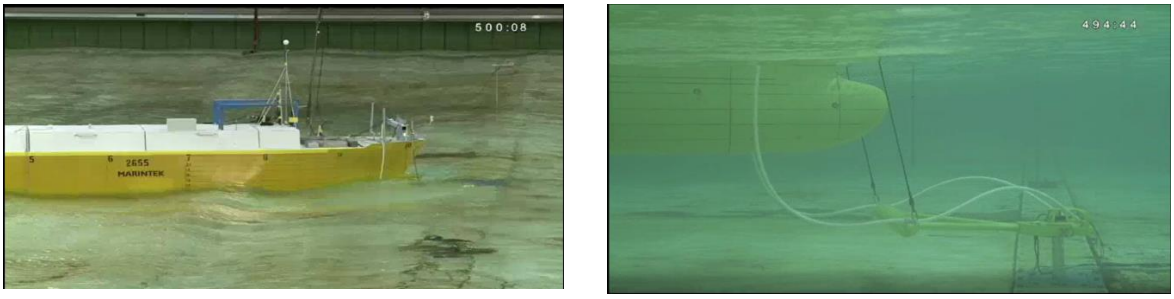

Figura 6 – Teste em tanque de provas na Noruega para comprovação de funcionalidade do sistema

Apesar de possibilitar a instalação e operação do FSRU com maior flexibilidade em relação às condições ambientais, a alternativa escolhida não soluciona todos os problemas. Em particular, as restrições ambientais passam a ser ainda maiores por conta da exposição às ondas, por exemplo, nas etapas que envolvem a operação de transferência do GNL em configuração STS. A transferência de carga nessas condições é normalmente realizada em condições amenas de mar e que devem perdurar por um período típico de 24 h, dependendo da capacidade de bombeamento e dos navios. Sendo assim, o sucesso da operação como um todo depende da execução coordenada e precisa de cada uma das etapas descritas, que se inicia no embarque do prático para a manobra de atracação e se encerra em sua descida após a transferência e desatracação, sendo que o processo não deve ser iniciado sem que se tenha uma boa previsibilidade da execução de todas as etapas do processo sem necessidade de interrupção.

A solução para esse problema foi mais uma vez realizada de forma inovadora e tecnológica, no qual se resolveu empregar equipamentos de monitoramento das condições ambientais e dos movimentos da FSRU integrados aos modelos computacionais do sistema MeDuSa®, que simula todas as operações do terminal e determina as janelas seguras tanto na operação em tempo real como no modo de previsão. Essa abordagem integrada de uso dos dados de medição de modelos computacionais põe em prática o uso do chamado Guardião Digital, ou *Digital Twin* em inglês, do terminal, elevando a operação ao nível mais moderno dos dias atuais. A Figura 8 apresenta o conjunto de modelos e equipamentos que compõem o sistema.

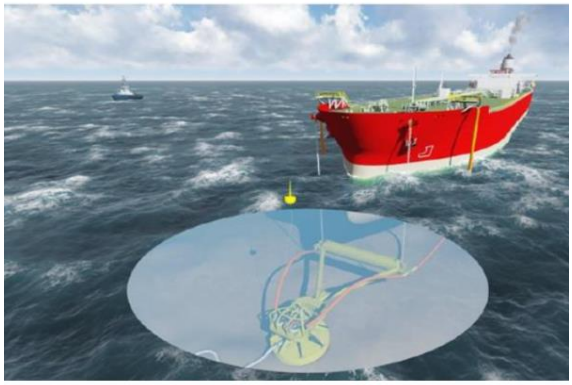

Figura 7 – FSRU Golar Nanook conectado ao sistema de ancoragem Yoke

Digital twin do terminal

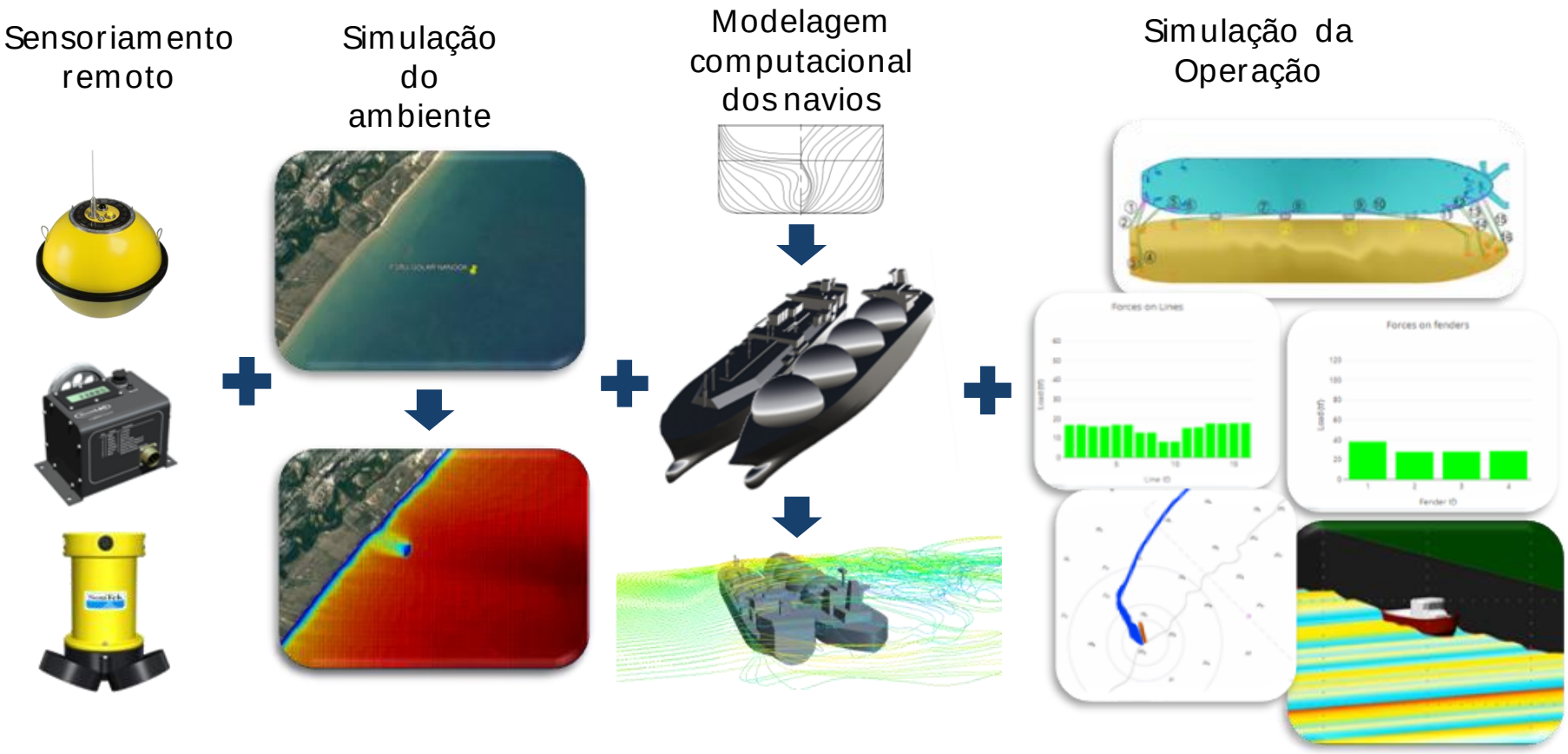

Figura 8 – Digital Twin do Terminal de GNL do Complexo Termelétrico de Barra dos Coqueiros

Ilustrado na Figura 9, o sistema de monitoramento das condições ambientais do terminal é composto por um marégrafo para medição de maré, um anemômetro para medição da velocidade e direção do vento e uma boia ODAS equipada com um ondógrafo e um adcp que fazem as medições de onda (espectro direcional, altura, período de pico e direção) e corrente (direção e velocidade), respectivamente. Todos os equipamentos são devidamente calibrados e passam por serviços de manutenção periódica a fim de garantir a qualidade dos dados fornecidos.

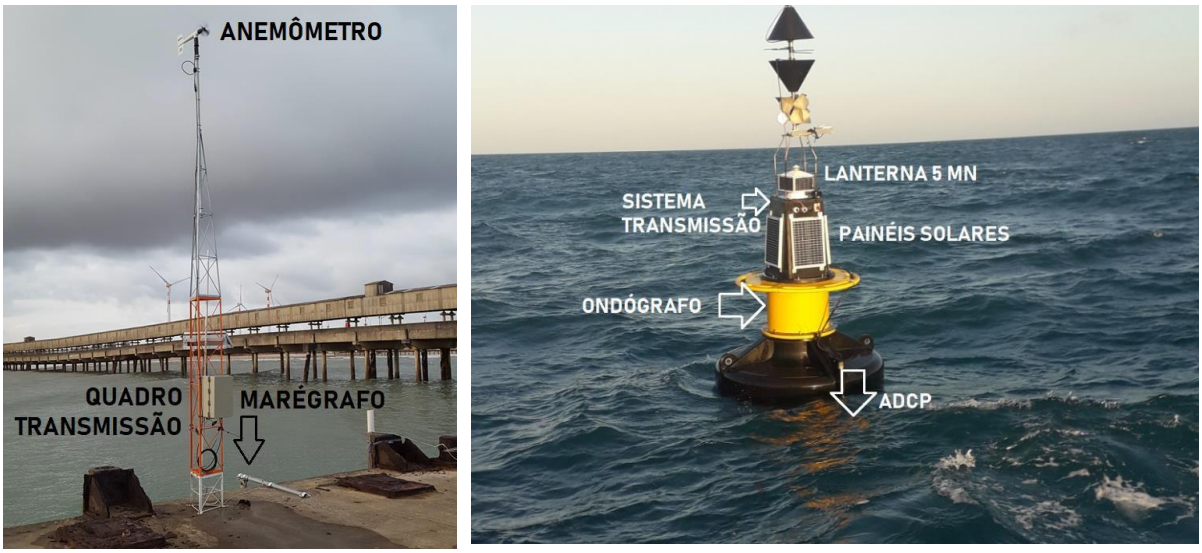

Figura 9 – Equipamentos de monitoramento instalados no terminal. Marégrafo e anemômetro (esquerda) e Boia ODAS (direita)

O posicionamento dos equipamentos no terminal pode ser observado na Figura 10.

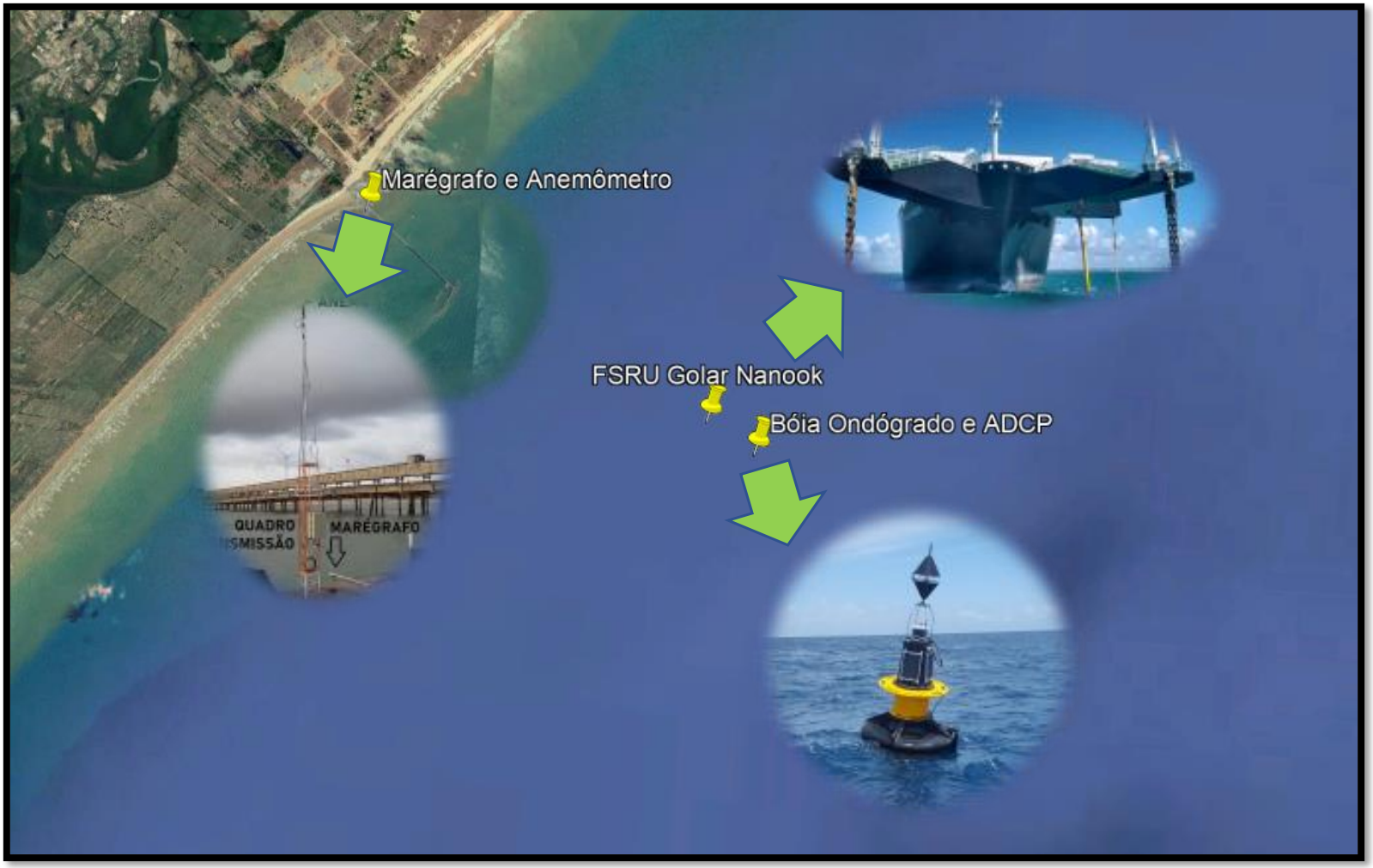

Figura 10 – Localização dos equipamentos de medição dos dados meteoceanográficos

O desenvolvimento do sistema MeDuSa® foi realizado em diversas etapas desde 2012, quando então ainda fazia parte de um projeto de pesquisa em parceria com o laboratório Tanque de Provas Numérico do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (TPN-USP). O principal objetivo da pesquisa foi desenvolver uma ferramenta de projeto que avaliasse o comportamento dinâmico de navios em ambientes portuários, em que os movimentos excessivos podem gerar sérios danos a estrutura do terminal e ao próprio navio, o rompimento de cabos com risco à vida humana, o rompimento de mangotes de transferência de cargas líquidas com poluição ao meio ambiente, entre outros.

A modelagem matemática desse problema exige que se leve em consideração os movimentos de um corpo rígido (navio) em 6 graus de liberdade sujeito aos agentes ambientais de onda, vento e corrente com vínculos bastante complexos, como cabos e defensas, que na maior parte das vezes possuem reações não lineares. Adicionalmente, muitas vezes deve-se considerar a interação hidrodinâmica entre um ou mais corpos, como no caso das operações *Ship-to-Ship* de transferência de carga.

As dificuldades observadas na época e a carência de códigos computacionais específicos e customizáveis a essa aplicação, levou a Argonáutica, em parceria com o TPN-USP, a desenvolver o MeDuSa®, o qual foi posteriormente registrado no INPI (Nº BR512016001714-7) em dezembro de 2016.

O processo de desenvolvimento e aplicação da ferramenta contou com a publicação de uma série de artigos científicos em revistas e congressos internacionais (exemplos: [2] [3] [4] e [5]) bem como com a realização de vários testes em ambiente de laboratório, nos quais os navios foram representados por modelos em escala reduzida e submetidos à incidência de ondas, vento e corrente em tanques oceânicos e túneis de vento. A partir desses testes, foi possível extrair os movimentos dos navios, os esforços nas amarrações, assim como as forças impostas pela ação do vento e da corrente e assim utilizá-los como paradigma de comparação e validação dos cálculos realizados pelo MeDuSa®.

A Figura 11 e a Figura 12 apresentam alguns testes realizados no tanque de ondas do TPN-USP e no túnel de vento do Instituto de Pesquisas do Estado de São Paulo (IPT) durante o desenvolvimento da ferramenta.

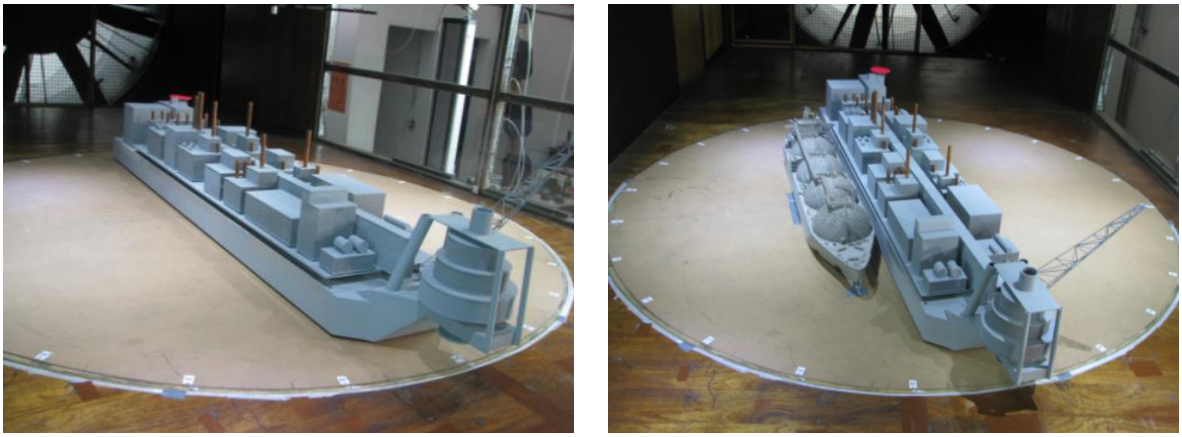

Figura 11 – Teste de navios em configuração *Ship-to-Ship* realizado no túnel de vento do Instituto de Pesquisas do Estado de São Paulo (IPT)

Figura 12 – Teste de navios em configuração *Ship-to-Ship* realizado no laboratório Tanque de Provas Numérico da Universidade de São Paulo

A ferramenta passou então a ser utilizada no estudo de diversos portos da costa brasileira e no mundo, incluindo países como Uruguai e Tanzânia. Ao todo, mais de 100 estudos de amarração em ambientes portuários já foram realizados com o MeDuSa®, englobando cenários de amarrações em berços, quadro de boias e monoboias, assim como em operações *Ship-to-Ship*. Com relação a esse último, o MeDuSa® já foi utilizado no estudo de dezenas de operações *Ship-to-Ship* para transbordo de óleo cru, incluindo o Porto do Açu- RJ, Porto de Suape – PE, Terminal de São Sebastião – SP e Terminal da Baía de Ilha Grande- RJ, além das operações de transferência de GNL nos três terminais de regaseificação operados pela Petrobrás no Brasil: os terminais de GNL da Baía de Todos os Santos - BA, da Baía da Guanabara - RJ e de Pecém – CE, ilustrados na Figura 13.

Baía de Todos os Santos - BA

Baía da Guanabara - RJ

Pecém - CE

Figura 13 – Terminais de Regaseificação de GNL em operação no Brasil

Com o advento da computação em nuvem, na qual os recursos computacionais passaram a ser praticamente ilimitados, a utilização do software MeDuSa®, que até

então era restrita a computadores desktop que necessitavam de algumas horas para processar os resultados, pôde começar a ser realizada em tempo real e com poucos segundos de resposta. Adicionalmente a este desenvolvimento, a transmissão de dados em tempo real também apresentou evoluções significativas, possibilitando a integração do sistema com dados de equipamentos meteoceanográficos instalados em ambiente portuários.

O primeiro exemplo de integração da ferramenta com dados medidos em tempo real se deu em 2016 no terminal de minério de ferro (TORE) do Porto do Açu – RJ, no qual o sistema foi customizado para receber dados de onda, vento e corrente e fornecer ao usuário os esforços nos cabos de amarração e defensa para diversos portes de embarcações de granéis sólido levando em consideração as condições de carregamento, planos de amarração, bordo de atracação etc.. Adicionalmente, o sistema também disponibiliza um histograma direcional de intensidade e direção do vento, ilustrando as condições seguras (verde) e de risco (vermelhas) com as quais o operador pode antecipar alguma decisão de salvaguarda, como, por exemplo, solicitar o auxílio de rebocadores para empurrar o navio contra o cais, aliviando a tração nos cabos, ou, eventualmente, decidir por retirar o navio do terminal.

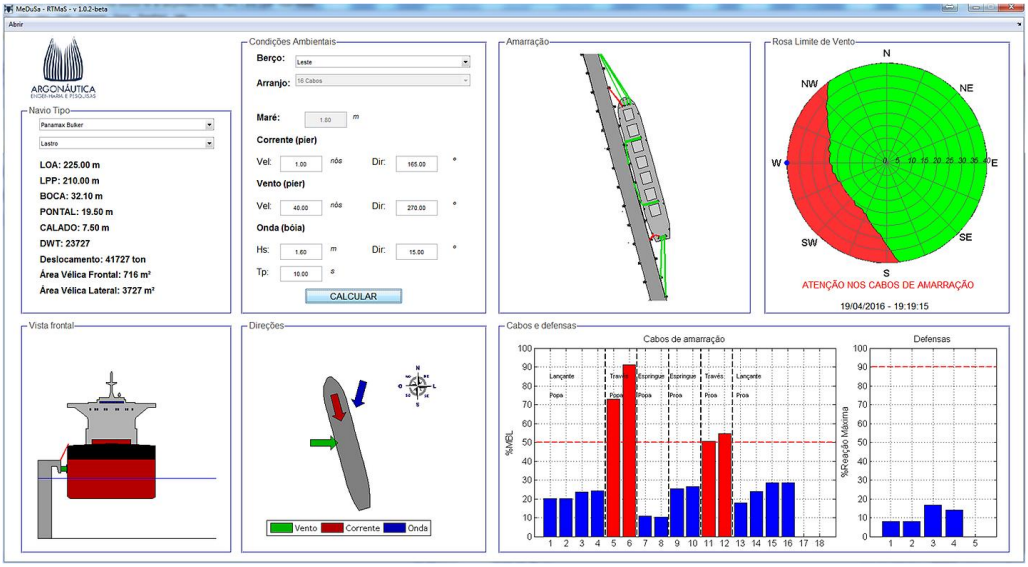

Figura 14 – Interface do sistema MeDuSa® desenvolvido para o Terminal de Minério de Ferro (TORE) do Porto do Açu

A versão mais atualizada do sistema MeDuSa® (mesma em operação no terminal de GNL de Barra dos Coqueiros) incorpora outras funcionalidades além

dessas relacionadas à amarração do navio. Por exemplo, os dados ambientais de onda, vento, corrente e maré que eram apresentados apenas em tempo real passaram a ser disponibilizados também com previsão de até 7 dias, melhorando a capacidade do terminal em planejar suas operações. Por se tratar de dados obtidos por modelos computacionais e, portanto, sujeito a erros de modelagem, os resultados das previsões são constantemente comparados aos dados medidos em campo pelos equipamentos, sendo corrigidos por algoritmos de assimilação que melhoram a acurácia das previsões dentro de um processo de auto-calibração.

Todo esse processo pode ser acompanhado pelo usuário em uma das telas da interface do sistema que ilustra as previsões de 7 dias de dados de corrente, vento, onda e maré, assim como a aderência das previsões de dois dias anteriores, as quais fornecem uma boa indicação sobre a acurácia dos resultados futuros. Um exemplo dessas previsões pode ser vista na Figura 15, que ilustra os dados de onda na parte superior e de maré na parte inferior da tela, sendo os dados do modelo de previsão apresentados em linha contínua e os dados medidos nas curvas pontilhadas. O momento da consulta é indicado na linha vertical.

A inclusão das previsões dos dados meteoceanográficos no sistema MeDuSa® permitiram que todos os fatores que fazem parte da operação do terminal também pudessem ser avaliados tanto em tempo real como em modo de previsão, possibilitando tanto melhorar o acompanhamento das operações quanto o planejamento com alguns dias de antecedência.

O MeDuSa® então recebe como dados de entrada os dados em tempo real e os de previsão e realiza um conjunto de operações para estabelecer parâmetros que indicam a viabilidade, ou não, de se realizar cada uma das seguintes etapas: embarque do prático no navio LNGC, manobra de aproximação e acostagem no FSRU, integridade dos cabos e defensas durante o processo de transferência de carga, movimentos/cargas no manifold de transferência, desatracação e manobra de retirada, e por fim o desembarque do prático. Deve-se ressaltar que as manobras de aproximação/desatracação devem ser realizadas com luz solar, um complicador adicional.

Figura 15 – Interface do sistema MeDuSa® – Comparação entre dados medidos e previstos pelo sistema

Os resultados de cada uma dessas operações são apresentados de forma clara e objetiva na interface do sistema, permitindo que o operador do terminal possa tomar as decisões necessárias para agendar o início da operação ou postergá-la a favor da segurança. A Figura 16 a Figura 18 apresentam alguns exemplos de funcionalidades e resultados que podem ser consultados no sistema.

É importante ressaltar que todos os dados dos sensores (onda, corrente, vento e maré) são obtidos automaticamente por protocolos específicos de comunicação entre os sistemas, provendo agilidade e evitando erros na inserção dos dados. As propriedades das embarcações fazem parte do enorme banco de dados do sistema, que conta com mais de 12.000 (doze mil) embarcações distintas, incluindo outros tipos de navios como porta contêiners, petroleiros etc. Além disso, o sistema realiza todos os cálculos remotamente via WebService e disponibiliza os resultados num link seguro e dedicado ao usuário. Devido ao formato WebService, o sistema pode ser periodicamente atualizado, incorporando sempre novas calibrações e estendendo o banco de dados de embarcações, garantindo controle de versões. Adicionalmente, esse formato faz com que o esforço computacional seja realizado por um servidor dedicado remotamente, permitindo o acesso multiplataformas, o que pode ser utilizado para disponibilizar os resultados via celular, tablet etc.

Dessa forma, pode-se perceber que a solução construída integra diversas soluções tecnológicas inovadoras visando ao baixo impacto ambiental, não tentando alterar as condições ambientais atuantes no terminal através de complexas obras de engenharia (dragagem e quebra-mares), mas sim tomando proveito das janelas operacionais disponibilizadas pela natureza de forma controlada, segura e inteligente.

Figura 16 – Ilustração da interface com o usuário para entrada de dados

Figura 17 – Ilustração da interface com respostas exibidas

Figura 18 – Ilustração das previsões de disponibilidade para planejamento operacional

5 A SITUAÇÃO HOJE, RESULTADOS E/OU IMPACTOS DA INICIATIVA

Os levantamentos de campo, estudos, simulações computacionais e testes em escala reduzida foram todos concluídos com sucesso ainda no ano 2017, permitindo que o projeto fosse otimizado antes de sua construção.

Em junho de 2018 foi autorizada pela ANP a instalação do gasoduto, o qual foi concluído em 2019, assim como a instalação da estrutura de fixação do Yoke.

A boia ODAS contendo os sensores para medição de condições meteoceanográfica foi devidamente licenciada e autorizada pela Marinha do Brasil, realizando a coleta de dados ambientais desde dezembro de 2018.

O sistema MeDuSa foi concluído em março de 2019, após a integração com os dados meteoceanográficos coletados pela boia ODAS, tendo sido testado, calibrado e aprimorado continuamente para melhor utilização pelos usuários. Adicionalmente, após a chegada da FSRU Golar Nanook na barra de Sergipe, os dados transmitidos em tempo real via AIS pela unidade têm sido coletados, servindo para a validação das ferramentas de simulação.

A FSRU Golar Nanook e o sistema de ancoragem Yoke foram customizados ao longo de 2018, tendo a unidade de regaseificação chegado à barra de Sergipe em março de 2019. O sistema Yoke foi instalado e conectado a FSRU em setembro de 2019, numa operação complexa em mar aberto conhecida como *hook-up* (Figura 19), que envolveu diversas embarcações de apoio, servindo também para familiarização do comportamento da unidade em mar aberto. A conexão com os dutos de exportação de gás foi também realizada nesse período (Figura 20), estando concluída essa integração entre terminal (FSRU) e UTE.

Desde então o sistema passa pelos testes de conexão, segurança e operação assistida, visando a garantir seu correto funcionamento e integração ao gasoduto e a UTE. Adicionalmente, os dados do comportamento da unidade têm sido coletados para aprimoramento da ferramenta de simulação MeDuSa®.

O recebimento da primeira carga está prevista para Janeiro de 2020 e efetiva operação da termelétrica.

Figura 19 – FSRU Golar Nanook com as correntes do sistema Yoke conectadas

Figura 20 – FSRU Golar Nanook com o riser de gás instalado

Os principais impactos visados com a operação do sistema é a geração de energia para a sociedade, com alta disponibilidade, segurança e eficiência das operações, produzindo resultados positivos tanto para a sociedade como empresas envolvidas no empreendimento. O projeto incentivou também a formação de mão-de-obra especializada local, ampliando a economia da região.

Adicionalmente, a construção desse empreendimento inovador mostrou ser viável a operação de um terminal para recebimento de GNL em águas desabrigadas de forma segura, antes visto como impossível, sendo uma solução com baixo impacto

ambiental e reduzido tempo de construção, resultado da combinação de conhecimento técnico, medição de dados em tempo real e ferramentas de simulação no estado-da-arte.

Essa solução pode ser replicada para outros locais da costa brasileira, permitindo o desenvolvimento sustentável da economia, principalmente em locais sensíveis ambientalmente, reduzindo também o tempo de implantação dos projetos e, consequentemente, trazendo resultados a economia brasileira de forma mais expedita.

6 PARCERIAS

A multidisciplinariedade do projeto, que envolve tanto a operação de uma usina termelétrica de geração de energia quanto à operação de um terminal marítimo de GNL inovador, fez com que diversas empresas de tecnologia de ponta se juntassem para apresentar a melhor solução no que será o maior complexo termelétrico da América Latina.

Em particular, apresentada na Figura 21, este trabalho apresentou os resultados da parceria formada entre as empresas CELSE, Golar LNG e Argonáutica Engenharia & Pesquisas que apresentaram uma solução inovadora que utiliza um conjunto de tecnologias a favor da preservação do meio ambiente para viabilizar o primeiro terminal marítimo de regaseificação de GNL na região costeira do Brasil que prescinde de realização de campanhas de dragagem de aprofundamento e da construção de quebra-mares, mesmo estando exposto à incidência de ondas.

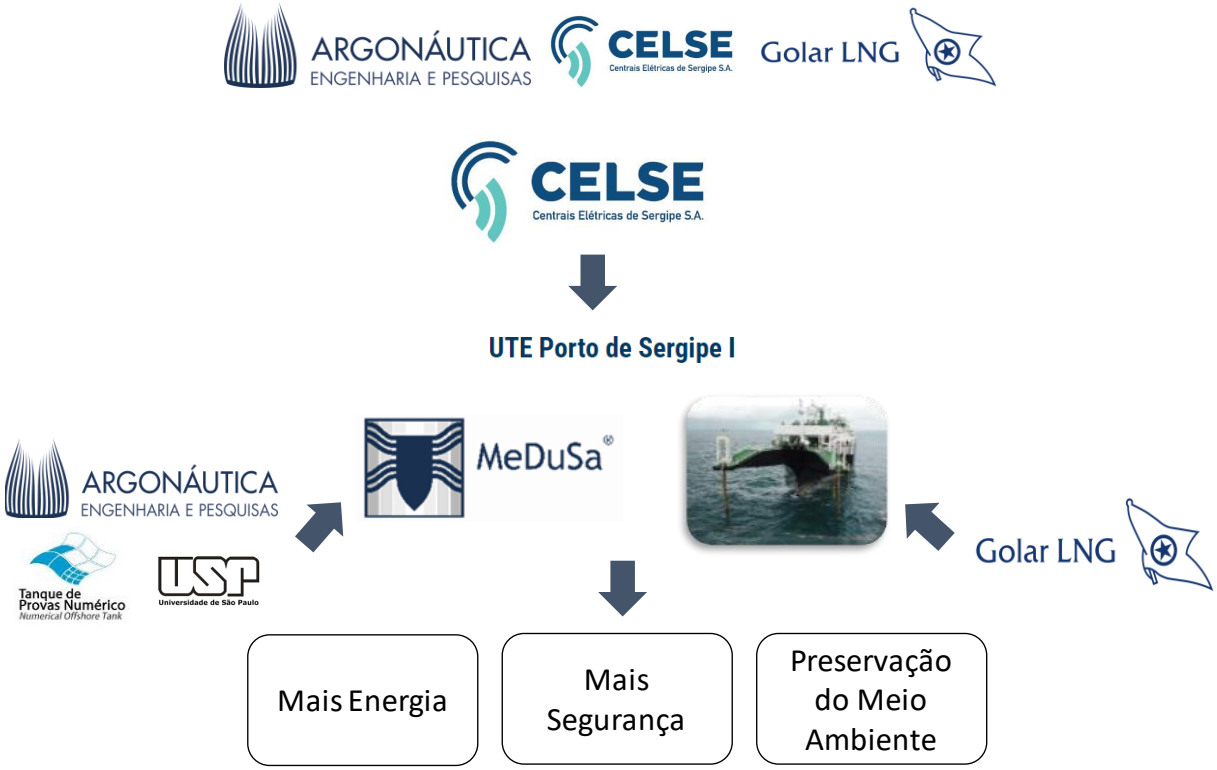

Figura 21 – Parceria formadas para o desenvolvimento da solução integrada UTE Porto Sergipe I, Golar Nanook e sistema MeDuSa

Inclui-se nessa parceria a longa relação de cooperação Empresa-Universidade entre a Argonáutica e o laboratório Tanque de Provas Numérico da Escola Politécnica da USP, da qual vem se observando relevantes frutos do ponto de vista de ciência aplicada, seja no desenvolvimento de novas metodologias a serem aplicadas no ramo da engenharia, quanto no lançamento de novos produtos com tecnologia no estado da arte que visam a melhorar o padrão de segurança dos trabalhos no mar e o respeito com o meio ambiente. Os modelos computacionais estado-da-arte foram desenvolvidos ao longo de muitos anos de pesquisa, ensaios em escala reduzida e testes em campo, sendo parte realizada durante as teses de doutoramento de dois funcionários da Argonáutica, que programaram o código computacional para predição do movimento de sistemas flutuantes no mar.

Ressalta-se ainda que todo este trabalho tem como principal beneficiária a sociedade, que será favorecida com a diversificação da geração de energia elétrica na região Nordeste, que atualmente é bastante depende de recursos hídricos numa região de longos períodos de estiagem, contando ainda com um projeto comprometido com a segurança e eficiência das operações e, principalmente, com a preservação do meio ambiente.

7 PARTICIPAÇÃO DOS USUÁRIOS OU DA SOCIEDADE EM GERAL

O desenvolvimento do projeto contou com ativa participação e colaboração das equipes técnicas da CELSE, Golar LNG e Argonáutica Engenharia & Pesquisas.

Em particular, quanto ao desenvolvimento do MeDuSa®, a colaboração foi fundamental para o desenvolvimento da iniciativa, já que o sistema foi essencialmente concebido por engenheiros navais e doutores, cuja percepção da forma de utilização do sistema no dia-a-dia precisou ser moldada às reais necessidades dos usuários. Dessa forma, o sistema desenvolvido permite que a informação necessária para a tomada de decisão seja fornecida ao usuário certo no momento necessário e na forma mais simples para ser utilizada.

8 GRAU DE REPLICABILIDADE

Os conceitos aplicados na viabilização do projeto que culminaram na prática inovadora apresentam alto grau de replicabilidade, podendo tanto ser estendido ao projeto de novos terminais de regaseificação de GNL na costa brasileira, quanto de maneira mais geral no sentido de fazer uso da tecnologia para criar soluções comprometidas com o meio ambiente sem abrir mão da segurança e eficiência.

No que se refere ao sistema MeDuSa® especificamente, por se tratar de uma ferramenta customizada, que considera as particularidades de cada porto específico nos cálculos, sua implantação exige um estudo técnico prévio que contribui para o melhor entendimento dos agentes ambientais críticos e na própria dinâmica das embarcações e impacto nos cabos de amarração, o que provê uma forma de organizar diversas bases de dados segmentadas numa plataforma única. Ainda assim, apesar desse grau de customização, que requer o detalhamento do ambiente e das condições ambientais, dos navios tipos, arranjos de amarração, número e porte de rebocadores etc., o sistema MeDuSa® pode ser adaptado para praticamente qualquer porto após a instalação dos sensores ambientais de monitoramento.

Cumpre mencionar que, durante sua customização para o terminal de GNL na CELSE, o sistema também foi implantado no terminal da Cattalini na Baía de Paranaguá, onde será utilizado para aumentar a segurança das operações do terminal

de granéis líquidos (produtos claros), carga perigosa e que requer grande planejamento para otimização operacional.

Estes exemplos mostram o alto grau de replicabilidade da iniciativa, que contribuirá para o aumento da segurança da navegação e eficiência dos portos brasileiros.

9 AS PRINCIPAIS BARREIRAS ENCONTRADAS NO DESENVOLVIMENTO DA PRÁTICA INOVADORA E COMO FORAM SUPERADAS

Uma vez que a solução apresentada para o projeto é inédita no Brasil, existiram diversas barreiras técnicas para sua implantação.

Dentre as principais barreiras enfrentadas, destacam-se:

BARREIRAS ENCONTRADAS	MOTIVOS DAS DIFICULDADES	COMO FOI SUPERADO
Integridade da conexão entre o FSRU e o gasoduto	O projeto adotou como premissa não construir um quebra-mar e não realizar dragagens de aprofundamento visando a reduzir ao máximo os impactos ambientais. No entanto, para atender às premissas, o terminal teve que ser deslocado para águas mais profundas aumentando sua exposição às ondas. Nesse cenário, o navio tende a adquirir movimentos oscilatórios significantes, podendo danificar a conexão com o gasoduto.	Foram realizados testes na Noruega que comprovaram a funcionalidade de um equipamento moderno denominado Soft-Yoke. O equipamento, customizado para as condições do Sergipe e utilizado pela primeira vez no Brasil, fornece maior complacência aos movimentos da FSRU, permitindo que ele oscile em ondas sem danificar a conexão com o gasoduto
Operação Ship-to-Ship em mar aberto	Além da conexão entre a FSRU e o gasoduto, a localização exposta às ondas também prejudica a realização das operações de abastecimento da FSRU, que são realizadas por operações Ship-to-Ship.	Além da aplicação do sistema Soft-Yoke, empregou-se o sistema de planejamento MeDuSa®, que permite determinar com segurança as janelas seguras para que as operações Ship-to-Ship possam ser realizadas, levando em consideração desde as dificuldades de embarque do prático, a manobra, processo de amarração e transferência de carga, até a retirada do navio e desembarque do prático.

Desenvolvimento de algoritmos para o cálculo dos movimentos dos navios e dos esforços nos cabos de amarração e defensas	Apesar da existência de softwares estrangeiros de prateleira, a aplicação em diversos problemas exige algumas adaptações e customizações que não podem ser completamente atendidos. A necessidade de se modelar o soft-yoke, a interação do FSRU com a batimetria local assim como as operações Ship-to-Ship são alguns exemplos.	Investimento em P&D para adaptação das ferramentas e resultados desenvolvidos ao longo de vários anos de pesquisas em parceria com a USP.
Construção de um banco de dados abrangente com diferentes tipos e dimensões de navios, arranjos de amarração e cabos	Por se tratar de uma ferramenta que opera em tempo real, torna-se necessário apresentar os resultados de maneira rápida e robusta, não sendo possível aguardar a modelagem de uma embarcação e amarração no momento da operação para posterior entrega de resultados.	Investimento em P&D e infraestrutura computacional para desenvolvimento de códigos numéricos de criação automática dos modelos e gerenciamento de banco de dados.
Integração do módulo de cálculo das respostas do MeDuSa® com os dados dos sensores ambientais em tempo real	Os cálculos realizados exigem a leitura automática dos dados ambientais medidos pelos sensores instalados, que são equipamentos que possuem interface própria de comunicação, sendo necessária a construção de protocolos próprios de comunicação para integração dos sistemas.	Investimento em P&D e apoio do usuário, que possui parceria com empresa específica de monitoramento ambiental, auxiliando no desenvolvimento dos protocolos de comunicação.
Disponibilização do sistema *online* sempre na versão mais atualizada com controle de versões e várias plataformas.	O sistema desenvolvido teve várias versões beta para testes e continua sendo constantemente atualizado para incorporação de atualizações e aprimoramento dos algoritmos de cálculo. Esse desenvolvimento requer um controle de versões do sistema e disponibilização em diversas plataformas, por exemplo, PCs, *tablets* e celulares.	Investimento no desenvolvimento do sistema em servidores remotos em ambiente cloud, capaz de realizar os complexos cálculos remotamente. Adicionalmente foi necessário investimento em servidores de grande capacidade computacional para realização dos complexos cálculos, que permite ao sistema a integração em diversas plataformas.

10 OS FATORES QUE CONTRIBUÍRAM PARA O SUCESSO DA PRÁTICA INOVADORA INSCRITA

O principal fator que contribuiu para o sucesso da prática inovadora foi a construção de parcerias com diversas entidades que se comprometeram com o projeto desde o início. A participação da CELSE primando pela garantia da segurança e eficiência operacional do terminal foi um fator essencial para o desenvolvimento e validação do sistema MeDuSa®. Por se tratar de um projeto piloto inovador, esse comprometimento foi fundamental no período de desenvolvimento e implantação.

Além disso, o sucesso essa prática inovadora ocorreu devido ao grande conhecimento sobre operações Ship-to-Ship construído no Brasil nos últimos anos, operação antes pouco conhecida por algumas Partes e Autoridades envolvidas. O amadurecimento desse conhecimento permitiu inclusive a criação de uma NORMAM (Normas da Autoridade Marítima) e Resoluções específicas da RFB / ANP / ANTAQ sobre o assunto, visando a simplificar o processo de licenciamento e autorização dessas operações.

Um fator também bastante importante foi o conhecimento adquirido com relação a navios de transporte de gás (LNGCs) e FSRUs, que começou a ser desenvolvido desde as primeiras FSRUs instaladas na Baía de Todos os Santos, Baía da Guanabara e Pecém. Nesse sentido, a parceria com o Tanque de Provas Numérico da USP foi bastante importante, uma vez que diversos estudos utilizando Dinâmica de Fluidos Computacionais (CFD), ensaios em escala reduzida em tanque de reboque, tanque oceânico, túnel de vento e visitas *in-loco* puderam ser realizados, visando a compreender o comportamento dinâmico desses sistemas flutuantes, fatores essenciais para uma correta modelagem. Essa parceria também serviu para o desenvolvimento de diversas ferramentas dedicadas ao estudo dessas operações.

11 REFERÊNCIAS

[1] ch2m, “Estudo de Impacto Ambiental - EIA - Complexo Termelétrico Barra dos Coqueiros - Instalações Offshore de Gás Natural, Adutora e Emissário Submarino - Volume 1,” 2017.

[2] F. Ruggeri, R. S. Lavieri, R. A. Watai, G. F. Rosetti, E. A. Tannuri e K. A. Nishimoto, “Methodology for the Analysis of Anchored Ship-to-Ship Operation in the Brazilian Coast Regarding Underkeel Clearance and Mooring Integrity,” em *Marine Operations Specialty Symposium (MOSS 2016)*, Singapore, 2016.

[3] F. Ruggeri, R. A. Watai e E. A. Tannuri, “Passing Ships Interaction in the Oil Terminal of Sao Sebastiao (Brazil): An Applied Study to Define the Operational Limits,” em *International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water with Special Focus on Ship Bottom Interaction, 4th MASHCON*, Hamburg, Germany, 2016.

[4] F. Ruggeri, R. A. Watai, K. Nishimoto, C. J. N. Sousa e R. E. Cruz, “On the Development of a Floating Port for the Brazilian Northeast Region Under Wave Action,” *Marine Systems & Ocean Technology,* 2017.

[5] R. A. Watai, F. Ruggeri, E. A. Tannuri e K. Nishimoto, “An Integrated Analysis for the Passing Ship Problem on Santos Port Considering Real-Time Simulations and Moored Ship Dynamics,” em *PIANC-World Congress*, Panama City, 2018.

[6] R. A. Watai, “Um método de elementos de contorno no domínio do tempo para análise de comportamento no mar de sistemas oceânicos,” *Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo,* 2014.

[7] F. Ruggeri, “Um método de ordem alta de paíneis para problemas lineares e fracamente não lineares de comportamento em ondas,” *Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo,* 2016.

[8] PIANC, “Report n. 121 - Harbour Approach Channels Design Guidelines,” The World Association for Waterborne Transport Infrastructure, 2014.

[9] PIANC, “Report nº 117 - Use of Hydro/Meteo Information for Port Access and Operations,” Bruxelas, 2012.

[10] PIANC, *Underkeel clearance for Large Ships in Maritime Fairways with hard bottom (Bulletin Nº51),* Bruxelas, 1985.

[11] K. Chua, P. C. Mello, E. Malta, R. Watai, F. Ruggeri, E. Taylor, K. Nishimoto e Y. Choo, “Irregular Seas Model Experiments on Sibe-by-Side Barges,” em *28th International Ocean and Polar Engineering Conference 2018*, Sapporo, Japan, 2018.

[12] W. R. A., F. Ruggeri, E. A. Tannuri, N. Santos, B. Tavares e J. dos Santos, “An Analysis Methodology for the Passing Ship Problem Considering Real-Time Simulations and Moored Ship Dynamics: Application to the Port of Santos, in Brazil,” *Applied Ocean Research,* vol. 80, pp. 148-165, 2018.