

PRÊMIO AEA ESG 2025

GÊMEO DIGITAL DE EMISSÕES SONDA DE PERFURAÇÃO – OTIMIZAÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E REDUÇÃO NAS EMISSÕES

**Eduardo A. Tannuri, Asdrubal do N. Queiroz Filho, Gustavo A. Bisinotto, Alex S. Huang,
Lariuss Zago, Gilberto F. M. Souza, Alécio Julio Silva, Edilson Veruz, Eduardo L. Pellini, Fuad
Kassab Jr., Ricardo P. Marques, Daniel Uehara, Paolo La Rosa, Breno P. Jacob, Fabricio
Correa**

**José Ricardo Brigido de Moura Filho, Cristiano A. C. Zank,
Douglas J. Rosa, André B. Medeiros, Paulo Cesar S. Silva**

USP, UFRJ, Petrobras, Constellation

RESUMO

Embora a redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE) seja urgente, os combustíveis fósseis ainda respondem por 80% da matriz energética mundial, com tendência de uso elevado até 2040. É essencial minimizar seu consumo na cadeia de produção. Nesse contexto, criou-se projeto de PD&I entre Constellation, Petrobras e USP para desenvolver o Gêmeo Digital de Emissões de um Navio Sonda (DT-NS), visando otimizar o consumo de combustível e reduzir a emissão de GEE. O DT-NS é um modelo digital fiel da embarcação e de seus sub-sistemas, simulando e interagindo em tempo real com a embarcação. O DT-NS pode identificar anomalias nos dados recebidos, prever o comportamento futuro e permitir otimizações, modificando o aproamento, parâmetros do sistema de controle de posição, uso dos propulsores e distribuição de carga nos geradores, respeitando restrições operacionais e de confiabilidade. Além disso, o DT-NS também permite testar em ambiente virtual novas propostas para redução de emissões, avaliando impactos e benefícios de sua implementação. O desenvolvimento do DT-NS engloba os modelos dinâmicos de movimentação e posicionamento do navio (forças ambientais, propulsores, controle de posicionamento dinâmico), do riser de perfuração (forças de restauração e restrições operacionais), do sistema de geração de energia, de emissões e de análise de confiabilidade. Inicialmente desenvolvido para o navio sonda Brava Star, posteriormente, essa tecnologia poderá ser expandida e aplicada a outras embarcações, contribuindo para reduzir as emissões de GEE de toda a frota.

Aplicabilidade

O estudo tem aplicabilidade direta na otimização do consumo de combustível em navios sonda, reduzindo significativamente as emissões de gases de efeito estufa. A tecnologia do Gêmeo Digital permite simular, prever e testar virtualmente estratégias operacionais mais eficientes. Após sua validação na Brava Star, poderá ser replicada em outras embarcações da frota, ampliando seu impacto ambiental positivo.

Objetivo

1. Desenvolvimento do tema

O objetivo dessa pesquisa é o desenvolvimento de um Digital Twin (Gêmeo Digital) de geração e emissões de um Navio Sonda (perfuração) que contempla:

- Desenvolvimento de um modelo dinâmico para medir a eficiência energética de sondas, integrado às condições operacionais e alinhado a metas de redução de emissões;
- Cálculo em tempo real das emissões de sondas com Posicionamento Dinâmico (DP – *dynamic positioning*);
- Simulação de operações para otimizar consumo e emissões, auxiliando na tomada de decisão prévia;
- Análise prospectiva (*look ahead*) de condições operacionais e ambientais futuras;
- Comparação entre eficiência energética da sonda real e do modelo digital, incorporando tecnologias como plantas de hibridização para prever impactos na eficiência energética global;
- Foco na otimização de emissões, considerando CO₂ equivalente (CO₂eq), CO₂, CH₄, N₂O e demais poluentes (SO₂, CO, NO_x, HC, mat. particulado), o Consumo Instantâneo de combustível e os critérios de degradação da unidade.

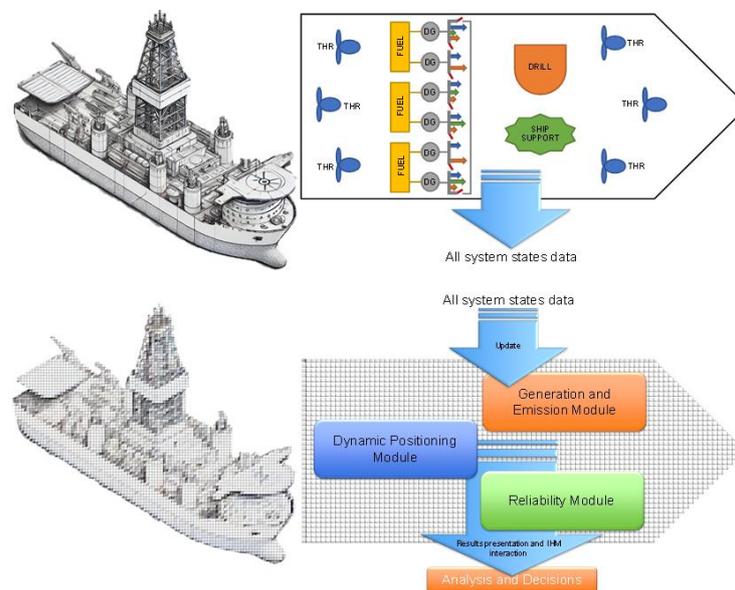


Figura 1 – (acima) Representação dos sistemas Físicos da Sonda de Perfuração; (abaixo) Representação do Gêmeo Digital de Emissões da Sonda, com os modelos dinâmicos alimentados por dados reais medidos, e sendo executado simultaneamente à operação real

Para isso, será necessária uma modelagem de todo o processo de emissões em uma Sonda DP, mapeando eventos e variáveis que impactam em consumo de combustíveis. Esse processo pode ser subdividido em:

- Demandas de consumo:
 - Condições ambientais (vento, onda e corrente) e Configurações da embarcação (ex. RAO – *Response Amplitude Operator*, e movimentos subsequentes como *heave*, *pitch* e *roll*) e do sistema DP;
 - Condições operacionais (criticidade de operação relativa ao poço, diagrama de restrições, operações simultâneas com outras embarcações);
 - Demais demandas auxiliares (Casario e Utilidades).
- Configurações de Sonda (diagrama unifilar, Sistema de Geração) e Combustível (Ex. SFOC – *Specific Fuel Oil Consumption*), permitindo o cálculo de Potências (Ativa, Reativa e FP) e Consumo instantâneo, respeitando os princípios de redundância e critérios de degradação;

- Processo de Combustão (temperaturas, potência nos geradores, composição, eficiência), permitindo o cálculo de Emissões (CO₂eq: CO₂, CH₄, N₂O e demais poluentes: SO₂, CO, NO_x, HC, mat. particulado).

Será usada a Sonda NS-45 (Brava Star) para testes e validação, pois já há sistemas medição de variáveis ambientais e de geração disponibilizados em tempo real, o que permitirá a calibração dos modelos. Além disso, algumas iniciativas preveem a medição de emissões em tempo real, completando a disponibilização dos dados para a validação dos modelos.

Através dessa simulação em tempo real, será possível a Otimização das Emissões (inicialmente pela Redução do Consumo) através de variáveis sugeridas relativas à demanda DP:

- **Otimização do aproamento** da embarcação considerando o menor consumo de potência na propulsão dadas as restrições operacionais (aproamento que reduza a resultante de esforços e minimize a necessidade de geração da sonda);
- Determinação de posição específica da sonda conectada ao poço de maneira integrada com uma análise de **Riser acoplada** em tempo real, de maneira a se utilizar parte da força do Riser disponível que ancora a sonda ao poço para reduzir o consumo de potência DP sem reduzir o afastamento permitido para desconexão de emergência;
- Definição de **tolerância em relação ao target position**, otimizando os ganhos a serem aplicados ao estimador Kalman pelo operador nos controladores dos três eixos (surge, sway e heading), considerando a máxima área de passeio tolerável da embarcação em função do WSOG – *Well Specific Operating Guidelines* – e o menor consumo de potência na propulsão, a depender de condições operacionais;
- Otimização do algoritmo de **alocação dos propulsores** visando o menor consumo de potência global na propulsão, mas preservando a tolerância a simples falha, considerando:
 - Número e posição de *thrusters* em DP, considerando lógica de alocação de empuxo, consumo de equipamentos auxiliares, perdas elétricas em alimentadores, transformadores, rendimentos dos motores elétricos;
 - Modo de operação ("*Free Run*" ou "*Thruster BIASING*"), avaliando frequência de mudança na direção azimutal e o valor de força mínimos nos equipamentos.

Cabe salientar que se trata de otimização multivariável onde há enorme interferência entre as mesmas (ex. um relaxamento na tolerância DP reduz a necessidade do *Biasing*), trazendo grande complexidade à otimização. De maneira geral, deve-se avaliar a eficiência de posicionamento para aquela determinada classe de sonda, otimizando a potência aplicada por empuxo requerido.

2. Gêmeo Digital de Emissões do Navio Sonda Brava Star

2.1 Modelo do sistema de DP

Todas as operações que um navio sonda realiza sobre um poço requerem que ele mantenha um controle preciso de sua posição. Assim, cerca de 40-60% da energia consumida por um NS é utilizada pelo sistema DP da embarcação.

O modelo do sistema de posicionamento inclui todos os parâmetros para calcular o movimento do corpo rígido em 6 graus de liberdade e os parâmetros para determinar as forças ambientais sobre a embarcação (vento, onda e corrente). A Figura 2 ilustra os modelos físico e computacionais utilizados para determinar os coeficientes de onda, vento e corrente.



Figura 2 – Modelos para determinar coeficientes de onda (esq.), vento (centro) e corrente (dir.)

Além disso, também são modelados os 6 propulsores azimutais do NS de 5,5 [MW] cada com suas curvas de torque, potência e dinâmica de tempo de resposta. E, finalmente, é modelado o sistema DP, que consiste em um algoritmo que calcula quais forças devem ser aplicadas pelos propulsores para manter a posição do navio sonda.

As condições ambientais, que são uma entrada desse sistema, serão obtidas por meio de uma combinação de técnicas de sensoriamento, contando com dispositivos dedicados à medição de vento e corrente instalados a bordo, e técnicas de estimação de ondas. Na inferência do estado de mar, serão empregados algoritmos de Inteligência Artificial para extrair informações sobre o campo de ondas no local a partir de sensores de movimento, de forma a mapear a variação temporal da resposta da própria embarcação em uma estimativa da condição ambiental incidente.

A figura a seguir mostra os testes iniciais desse modelo de posicionamento realizados no laboratório do Tanque de Provas Numérico da USP (TPN-USP)



Figura 3 – Testes iniciais realizados em 2024 do modelo dinâmico da sonda no TPN-USP

Utilizando dados reais previamente coletados da NS Brava Star, foi possível simular e comparar o modelo do sistema de posicionamento do Gêmeo Digital com o navio real. Foram feitas simulações de uma hora, onde a entrada eram as condições ambientais e a posição de referência do sistema DP. As figuras a seguir ilustram o resultado da simulação para o dia 12/07/2023 das 10:00 às 11:00 da manhã. A Figura 4 mostra as forças médias (direção e intensidade) de cada propulsor, a Figura 5 compara os valores dessas forças médias e a Figura 6 mostra o erro de aproamento da embarcação ao longo do tempo. Nas 3 figuras, os dados da embarcação real estão em azul e os resultados do DT-NS, em vermelho.

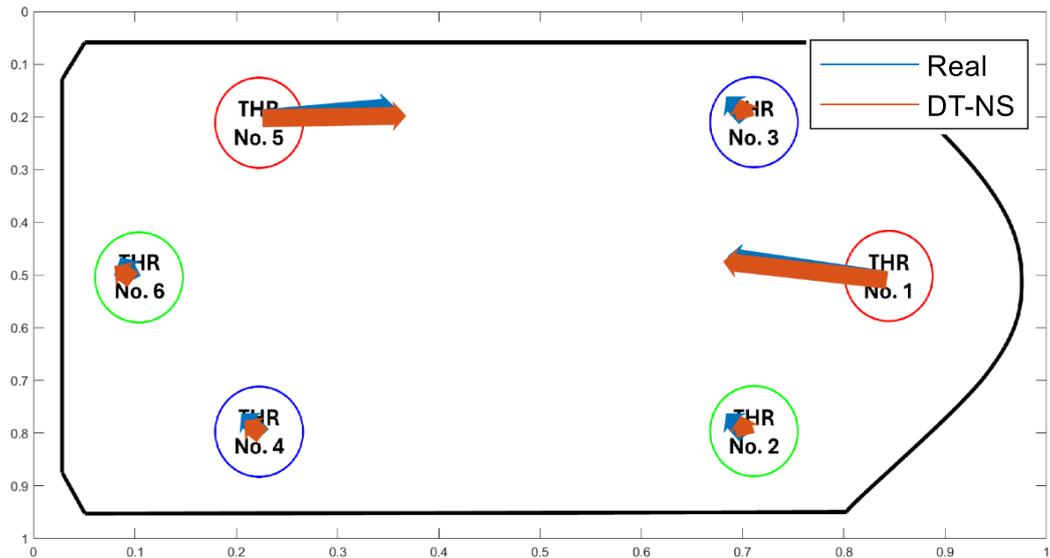


Figura 4 – Direção e intensidade média de cada propulsor

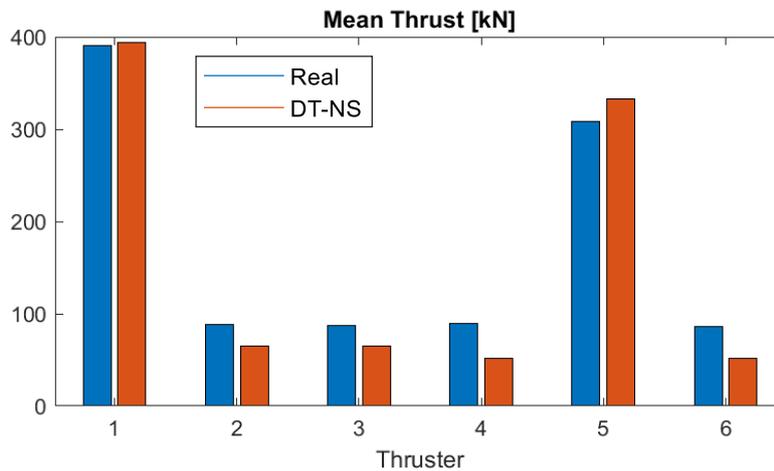


Figura 5 – Comparação da força média em cada propulsor

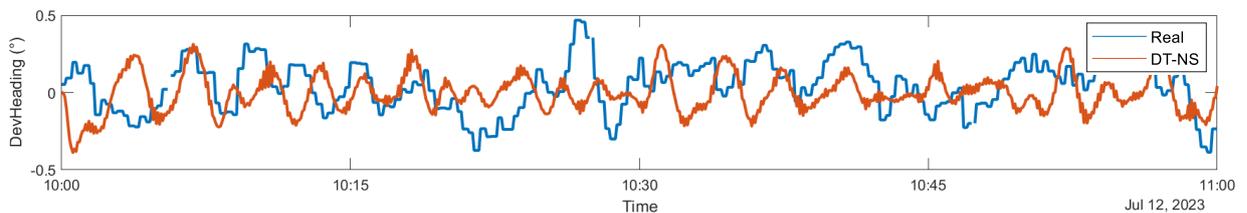


Figura 6 – Série temporal do erro de aproamento da embarcação

2.2 Modelo do sistema de geração e consumo

A topologia elétrica principal da embarcação é constituída por três barras independentes – bombordo (PORT), centro (CENT) e estibordo (STBD) – operando no nível de tensão de 11,0 [kV] em corrente alternada de 60,0 [Hz], para uma potência total de 51,7 [MVA]. Cada barra é dividida em duas seções (A e B) interligadas por um disjuntor de interligação (TIE). Adicionalmente, as três barras podem ser conectadas entre si, através de disjuntores mestre-subordinado, permitindo a configuração de diferentes topologias de geração e distribuição de energia, como esquemas de três barras isoladas,

duas barras interligadas, barra única ou anel fechado. Essa topologia pode ser vista no diagrama unifilar da Figura 7 a seguir.

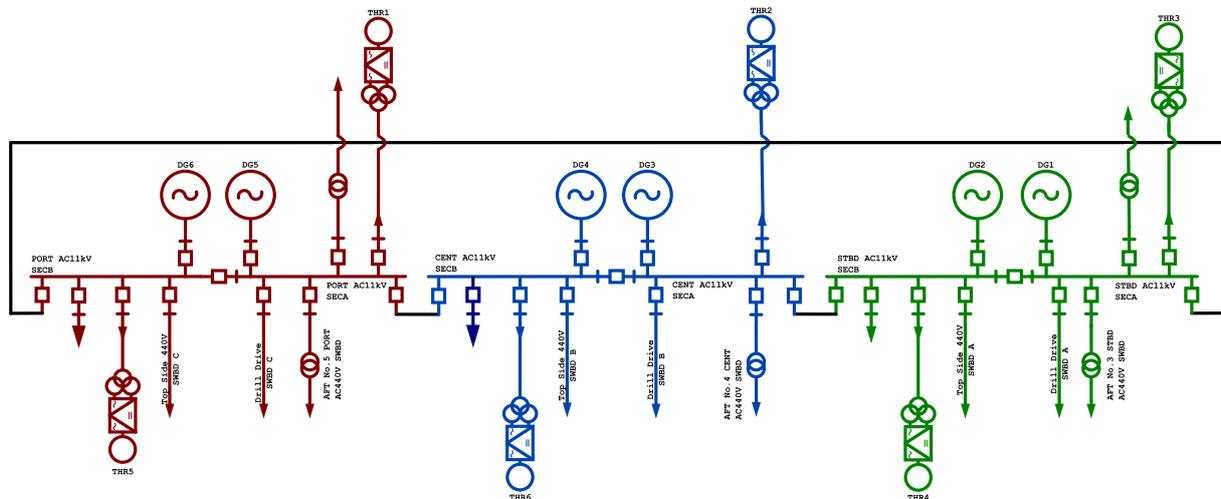


Figura 7 – Diagrama unifilar simplificado do sistema de geração e consumo energético, no nível de tensão de 11,0 [kV]

O sistema de geração elétrica é composto por seis geradores síncronos acionados por motores diesel, equipados com reguladores de tensão e velocidade, e integrados a um sistema de automação, proteção e controle. Esse sistema está sendo estudado para o desenvolvimento de um modelo físico, capaz de simular seu comportamento dinâmico, tanto em operação isolada dos geradores quanto em compartilhamento de cargas, abrangendo condições normais e cenários de contingência. Este modelo incorporará diversos parâmetros dos equipamentos, permitindo a análise detalhada da resposta do sistema de geração às diversas variações em sua demanda. Esse modelo de geração é conectado a um sistema que representa a dinâmica dos motores diesel, com seu consumo e emissões, descrito adiante no artigo. Pretende-se que esses modelos, juntos, possam representar a geração da embarcação (consumo e emissões) durante os fenômenos eletromecânicos resultantes do balanço instantâneo de geração versus carga e também em regime permanente.

A modelagem das cargas da embarcação abrange diferentes naturezas de consumo para DP, perfuração e hotelaria. O sistema DP representa uma parcela significativa da demanda dos alimentadores dedicados aos propulsores (*thrusters*). Para isso, o modelo do sistema de posicionamento da embarcação (*versus* condições ambientais e condições de rigidez do *riser*) envia constantemente as demandas de potência e orientação azimutal dos *thrusters*, que devem ser convertidas para cargas elétricas equivalentes usadas no modelo de geração. O consumo dos processos industriais de perfuração e operação com o *riser* é outra natureza de carga relevante no navio sonda. Esse tipo de carga tem uma demanda prevista em cronogramas de atividades, mas também está sujeita a variações e solicitações aleatórias, dependendo das reais condições operacionais. Por fim, as cargas de hotelaria e suporte às operações do navio (ar condicionado, aquecimento, iluminação, bombeamento, sistemas de emergência, segurança, etc.) apresentam um padrão de consumo sazonal, mas que também podem sofrer alterações (alívios ou solicitações) súbitas. O comportamento estocástico de todas essas cargas está sendo analisado para a elaboração de modelos computacionais, parametrizados, com representações das cargas em impedância constante, potência constante, corrente constante ou combinações destas, para incorporação ao simulador da rede elétrica do navio. Pretende-se que esses modelos sejam capazes de representar as cargas elétricas do navio, em cada instante de tempo, numa representação compatível para análise em regime permanente senoidal equilibrado.

A compreensão de todo esse processo de geração, distribuição e uso da energia elétrica requer o estudo detalhado dos sistemas primários de 11,0 [kV], bem como dos subsistemas em 440,0 [V] e 220,0 [V] em corrente alternada, e de vários outros sistemas em corrente contínua. O estudo é feito a partir de uma análise de toda a documentação disponível de projeto e de comissionamento do navio. De forma complementar, também é feita uma análise da massa de dados operacionais disponíveis a bordo, coletada a partir dos sistemas de aquisição de dados e automação, disponibilizados por telemetria para

análise em terra. Isso inclui grandezas como tensões, correntes, frequências, potências (ativa, reativa e aparente) – de barras, geradores e alimentadores – e estados digitais de chaves, disjuntores e sistemas de automação e proteção. O objetivo é verificar o comportamento real de cada componente do sistema elétrico em diversas missões e condições de operações, sejam normais ou degradadas, como na ocorrência de blackouts parciais ou totais. Esta ciência de dados envolve mais de 350 variáveis de ponto flutuante e booleanas, coletadas com periodicidade de 1,0 [s] ou 5,0 [s], por diversas semanas e meses.

A análise aprofundada desses dados, além de verificar a consistência e disponibilidade das informações disponíveis e suas respectivas incertezas, fundamenta a parametrização e a constituição dos modelos dos sistemas físicos de geração, das cargas de propulsão DP, das atividades de perfuração e cargas de hotelaria e suporte. Adicionalmente, técnicas de Machine Learning e Inteligência Artificial estão sendo consideradas para auxiliar na identificação de padrões complexos nos dados operacionais, otimizando a parametrização e a construção de modelos preditivos mais precisos para o sistema de geração e suas diversas naturezas de cargas e solicitações.

Para apoio na validação dos modelos desenvolvidos, além do uso de dados reais, o projeto do Gêmeo Digital tem desenvolvido um simulador em tempo real em uma ferramenta consagrada de estudos elétricos, um RTDS (*Real Time Digital Simulator*). A modelagem realizada também poderá ser usada no futuro para testes e ensaios em malha fechada, para verificação do funcionamento de controladores e dispositivos de proteção e automação, para a proposição de melhorias e otimizações na arquitetura do sistema elétrico da sonda.

O objetivo final do modelo do sistema de geração e consumo é constituir um simulador digital capaz de receber as demandas instantâneas do sistema DP, as condições programadas de perfuração da missão planejada, e as necessidades elétricas operacionais do navio para verificar as condições de fornecimento energético da embarcação. Com isso é possível criar “indicadores digitais”, que evidenciem as margens operacionais, os limites de estabilidade de carga *versus* frequência e tensão, as perdas e o balanço energético geral do verdadeiro sistema físico.

Este modelo do sistema de geração operará em tempo real no modo "sombra" (*shadow*) do Gêmeo Digital, rastreando os estados físicos relevantes do navio a partir dos dados coletados a bordo pelos sistemas de aquisição, calculando resíduos e incertezas das variáveis observadas, e estados e indicadores de desempenho. Além disso, o modelo também pode ser usado de forma a realizar a previsão (*forecast*) de curto, médio e longo prazo (de horas a semanas) desses estados, fornecendo mais indicadores, alertas e recomendações, para orientar a excelência operacional em termos de consumo de combustível, eficiência energética e redução de emissões. Essas previsões podem ser requisitadas, por exemplo, pelos modelos que analisam a confiabilidade do navio ou pela eventual indisponibilidade de equipamentos (thrusters, geradores e outros sistemas) por conta de falhas ou manutenção.

É importante ressaltar que, por meio dessa ferramenta de simulação, vários estudos também podem ser realizados para a análise e otimização do navio, por exemplo, para a alocação dos geradores e a distribuição das cargas em diferentes modos de operação dos barramentos (como barra única ou barra fechada), e para explorar e evidenciar oportunidades de operação com maior eficiência, com rastreamento dos níveis de confiabilidade da embarcação.

2.3 Modelo de emissões

O modelo de emissões produzirá estimativas da emissão de gases baseadas na condição operacional dos motores diesel ligados aos grupos geradores. Em termos gerais, as emissões de motores diesel tipicamente estão relacionadas e são diretamente proporcionais, em regime estacionário, à velocidade de rotação dos motores e ao torque produzido em função da carga elétrica. O torque produzido, que não é medido, pode ser inferido a partir do consumo instantâneo de combustível de cada motor ou da potência elétrica gerada. Durante transientes, a emissão de gases é um fenômeno bastante mais complexo e de difícil modelagem. Na etapa atual do projeto ainda não se tem informações suficientes para permitir afirmar se será possível realizar a modelagem considerando os transientes operacionais. Caso isso se confirme, as emissões utilizarão um modelo quase-estático baseado nas curvas de emissão para cada modelo de motor ou curvas típicas da Literatura na ausência

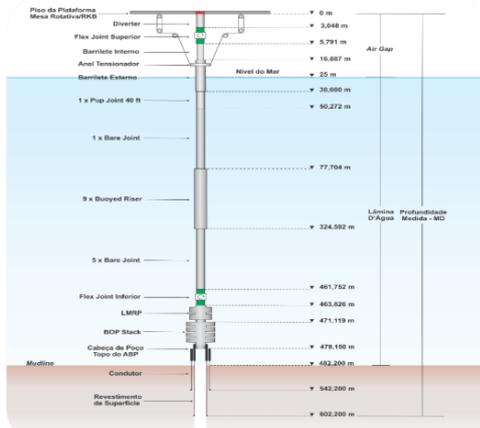
2.4 Modelo do riser de perfuração

O DT-NS inclui a integração com uma ferramenta computacional, denominada de DrillingSAFOP, voltada à análise da rigidez horizontal e verificação da integridade estrutural de risers de perfuração em operações offshore. A metodologia adotada contempla duas etapas principais: (i) a geração de mapas de rigidez horizontal, que quantificam a contribuição de forças reativas do riser em função de offsets da sonda, e (ii) a verificação de critérios quase-estáticos de projeto, permitindo a definição de uma zona segura de operação (SAFOP) para o sistema DP.

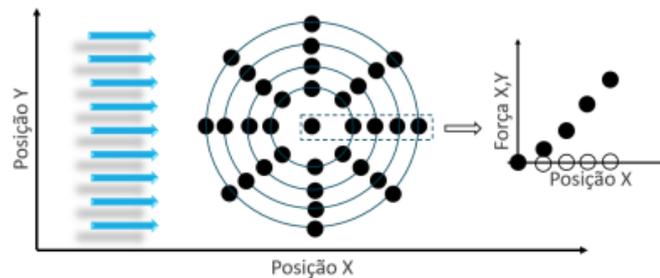
A partir de um modelo geométrico e estrutural do riser gerado no RiserWeb (sistema desenvolvido pela Petrobras e LAMCSO/COPPE/UFRJ), a ferramenta executa uma série de simulações por elementos finitos avaliando o comportamento da coluna de riser sob ação de corrente marinha e offsets da embarcação em distintas direções radiais. O perfil de corrente da simulação pode ser adotado entre o definido no modelo do RiserWeb ou por um perfil fornecido pelo usuário em arquivo de entrada JSON.

Para cada direção analisada (e.g., 8 ou 16 direções radiais), são definidos múltiplos pontos de offset (tipicamente 20), resultando em um conjunto de simulações que fornecem as forças resultantes no topo da coluna de riser nas direções horizontais (E, N) e verticais (Z), além de fatores de segurança associados a critérios como ângulos de flex joints, momentos na BAP (Base Adaptadora de Produção) e na cabeça do poço, deslocamentos axiais, e tensões equivalentes (*Von Mises*) no riser e casing (Figura 8). Os resultados são compilados em um arquivo JSON estruturado, utilizado posteriormente como insumo para ferramentas de otimização da posição da sonda.

O processamento das simulações ocorre de forma automatizada e paralela, explorando a capacidade computacional disponível para redução do tempo total de execução. Estudos de caso com diferentes perfis de corrente foram realizados para validar a robustez da metodologia e avaliar o comportamento não linear do sistema. Os resultados preliminares demonstraram que o método é sensível às condições ambientais e pode identificar zonas operacionais com menor exigência de força reativa, o que é fundamental para estratégias de eficiência energética e redução de emissões.



Componentes de um riser de perfuração



Mapa de rigidez

Figura 8 – (esq.) Componentes de um riser de perfuração. (dir.) Ilustração do mapa de rigidez

2.5 Modelo análise de confiabilidade

O modelo de análise de confiabilidade pretende integrar os resultados do cálculo de confiabilidade ao Gêmeo Digital de Emissões da Sonda DP Brava Star, permitindo assim avaliar o risco operacional da planta para perda de posição em cenários de condição normal e degradada. Três macro atividades estão sendo desenvolvidas nesta frente:

- Definir a causa-raiz de degradações (ou falhas) críticas no sistema de propulsão da sonda (incluindo a praça de máquinas, distribuição elétrica e propulsores), possibilitando a definição de equipamentos críticos sob o ponto de vista de confiabilidade;
- Realizar uma avaliação racional, de natureza probabilística, da possibilidade de mudanças na ocorrência de falhas críticas ao longo de uma campanha operacional, subsidiando decisões em conformidade com as análises CAMO (*Critical Activity Mode of Operation*) e TAMO (*Task Appropriate Mode of Operation*), mantendo uma avaliação dinâmica do risco operacional;
- Desenvolver uma política de manutenção preditiva, baseada na aplicação de técnicas de Inteligência Artificial para detecção de anomalias em sinais de monitoração, para equipamentos críticos, os quais, em caso de falha, podem deflagrar a ocorrência de falhas críticas no sistema de propulsão.

Algumas técnicas de confiabilidade como a análise de dados de vida e diagrama de árvore de falhas têm sido implementadas visando a modelagem de confiabilidade do sistema DP. A Figura 9 apresenta um caso exemplo do sistema de propulsores da sonda DP Brava Star, cuja confiabilidade foi modelada utilizando as técnicas de confiabilidade citadas.

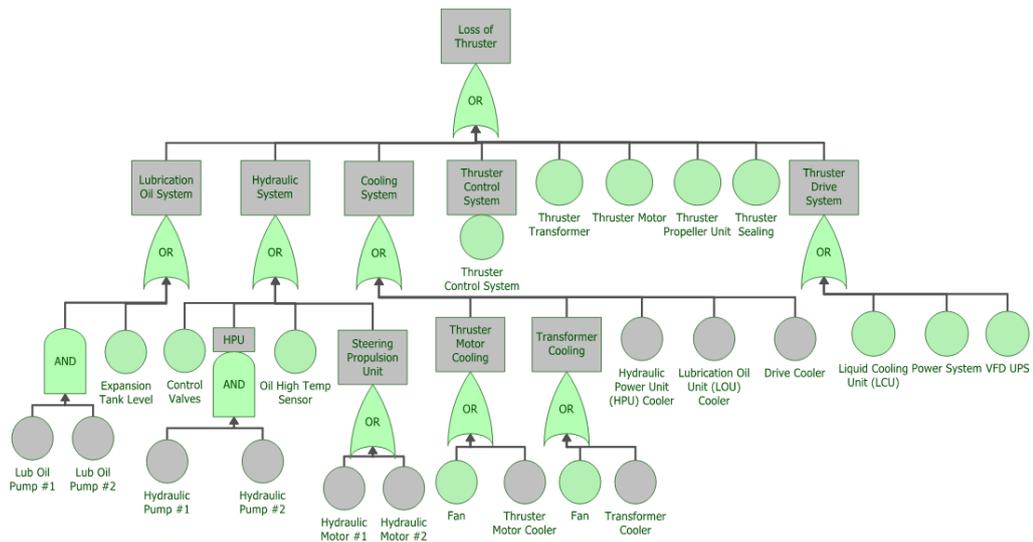
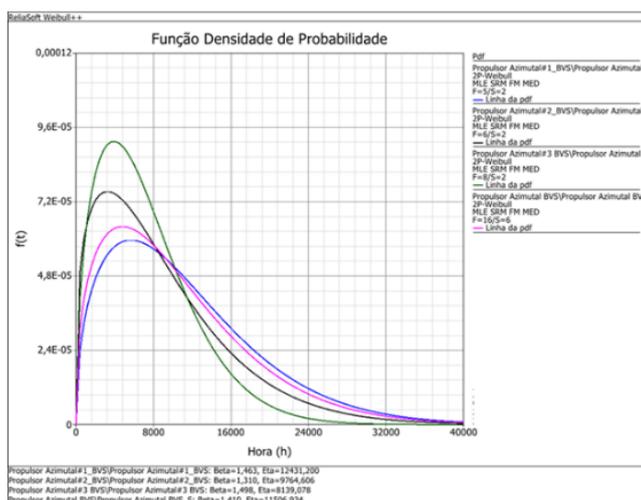


Figura 9 – Diagrama de árvore de falha do propulsor de um navio sonda

Com base na análise dos eventos históricos do sistema DP da Brava Star provenientes do banco de dados de eventos de falha, torna-se possível a predição antecipada da probabilidade de ocorrência de falhas críticas ao longo de uma campanha operacional no sistema DP. A Figura 10 apresenta curvas de densidade de probabilidade de falha obtidas pelo processo de modelagem de confiabilidade para propulsores de um navio sonda.



Thuster Azimuth System

Resultado cálculo parâmetros Weibull:

THR #1

Beta (β) = 1,46

Eta (η) = 12431 horas

THR #2

Beta (β) = 1,31

Eta (η) = 9764 horas

THR #3

Beta (β) = 1,49

Eta (η) = 8139 horas

THR BVS

Beta (β) = 1,41

Eta (η) = 11506 horas

Figura 10 – Curvas de densidade de probabilidade de falha de propulsores de um navio sonda

3. DTV Modo Sombra, Preditor e Otimizador

O Gêmeo Digital DT-NS operará em três modos: sombra, preditor e otimizador, que atendem a diferentes requisitos do sistema. A implementação desses modos se dará por virtualização baseada em *containers*, o que permitirá o reuso de módulos e a implementação de um número variável de instâncias, tanto para a geração de múltiplos cenários como para otimização, minimizando os requisitos funcionais e garantindo independência e desacoplamento entre os múltiplos processos dos simuladores.

3.1 Modo sombra

O modo sombra se destina à detecção em tempo real de problemas operacionais do navio sonda por meio da identificação e avaliação de divergências entre os dados coletados do navio e suas contrapartes produzidas por meio de um simulador detalhado do sistema. O simulador é conectado a um módulo preditor/corretor, que adiciona resíduos às variáveis divergentes do simulador para que estas converjam aos dados reais. Em operação normal, tais divergências são mínimas e produzem assinaturas específicas dos sinais de resíduo, indicando o estado normal do sistema. Caso falhas ou degradação de equipamentos ou alteração em condições ambientais façam com que haja diferenças significativas entre o comportamento dinâmico real do sistema e o previsto pelo modelo, tal situação será refletida nos sinais de resíduos, os quais comparados a assinaturas postuladas para diferentes eventos e falhas típicas, indicarão um diagnóstico em tempo real do estado operacional do sistema baseado na comparação dos resíduos produzidos em tempo real com uma biblioteca de assinaturas.

No modo sombra, requer-se que uma única instância do simulador do sistema seja executada em tempo real acoplada ao preditor/corretor. Dentre os modos previstos para o DT-NS, este é o que menos consumirá recursos computacionais para o simulador, de modo que a simulação do modo sombra poderá utilizar um modelo mais detalhado do processo.

A arquitetura do Gêmeo Digital para operação em modo sombra é apresentada na Figura 11 a seguir. Note-se que os diferentes módulos necessários para operação do modo sombra são implementados em *containers* conectados em rede virtual, executados em um mesmo sistema host. Isso permite que um sistema de gerenciamento possa disparar diferentes módulos conforme necessidade, mantendo a independência funcional e o desacoplamento entre eles.

3.2 Modo preditor

O modo preditor se destina à avaliação de diferentes cenários potenciais, postulados em termos de situações críticas típicas ou falhas de maior probabilidade de ocorrência em contextos operacionais

específicos, conforme indicados pelo módulo de confiabilidade (V. Figura 11). Uma sequência de cenários potenciais é produzida a intervalos regulares e alimentada a diferentes instâncias do simulador, produzindo curvas com a evolução de variáveis relevantes do processo para um horizonte de predição pré-definido. O conjunto dessas curvas constitui-se num envelope operacional que considera as condições operacionais correntes do navio sonda e eventuais eventos verossímeis dentro do horizonte de predição.

Para que o modo preditor seja relevante para a operação do navio sonda, é necessário que uma lista relativamente extensa de eventos operacionais seja considerada. Por exemplo, para uma dada condição de manobra, devem ser simuladas as falhas dos sistemas geradores e respectivos impactos, falhas de propulsores, alterações nas condições ambientais, etc. Além disso é necessário que o horizonte de predição considerado permita a previsão de situações críticas com a antecedência necessária para que os operadores tomem ciência e avaliem ações em tempo hábil. A depender de cada cenário, o horizonte de predição pode variar de dezenas de minutos (para falhas de equipamentos) ou diversas horas (para condições ambientais). Em qualquer dos casos, é necessário que os cenários potenciais sejam produzidos rapidamente.

Como o tempo de execução necessário para a produção de um conjunto de cenários é extremamente exíguo, é necessário que os modelos do modo preditor sejam bastante simplificados em relação aos modelos empregados no modo sombra.

A arquitetura do DT-NS para o modo preditor é bastante similar à da Figura 11, com a diferença de que várias instâncias da plataforma de simulação são disparadas a cada instante de tempo. A implementação desse processo é grandemente facilitada pela abordagem de virtualização.

3.3 Modo otimizador

O modo otimizador estende a implementação do modo preditor para que parâmetros operacionais sejam iterativamente testados por um algoritmo de otimização para minimizar índices pré-determinados de mérito, por exemplo: consumo de combustível, emissões ou risco de acidentes. Neste modo, o número de instâncias da plataforma de simulação pode crescer exponencialmente a depender do número de parâmetros a serem otimizados e dos cenários postulados, o que requer o uso de modelos simplificados e, potencialmente, implementação distribuída em vários processadores, uma abordagem também facilitada pela abordagem de virtualização adotada.

4. Aplicação a outras embarcações

Neste momento, o DT-NS está sendo desenvolvido especificamente para o navio sonda Brava Star, mas, posteriormente, essa tecnologia será expandida e aplicada a outras embarcações, contribuindo para reduzir as emissões de GEE de toda a frota.

CONCLUSÃO

A construção do Gêmeo Digital de Emissões do navio sonda Brava Star representa um avanço significativo rumo à operação mais sustentável de unidades offshore. A integração de modelos dinâmicos e dados em tempo real permite não apenas otimizar o consumo energético e reduzir emissões, mas também antecipar falhas e testar soluções inovadoras em ambiente virtual. A adoção dessa tecnologia poderá transformar a gestão operacional de sondas, com impactos positivos em toda a cadeia de exploração.

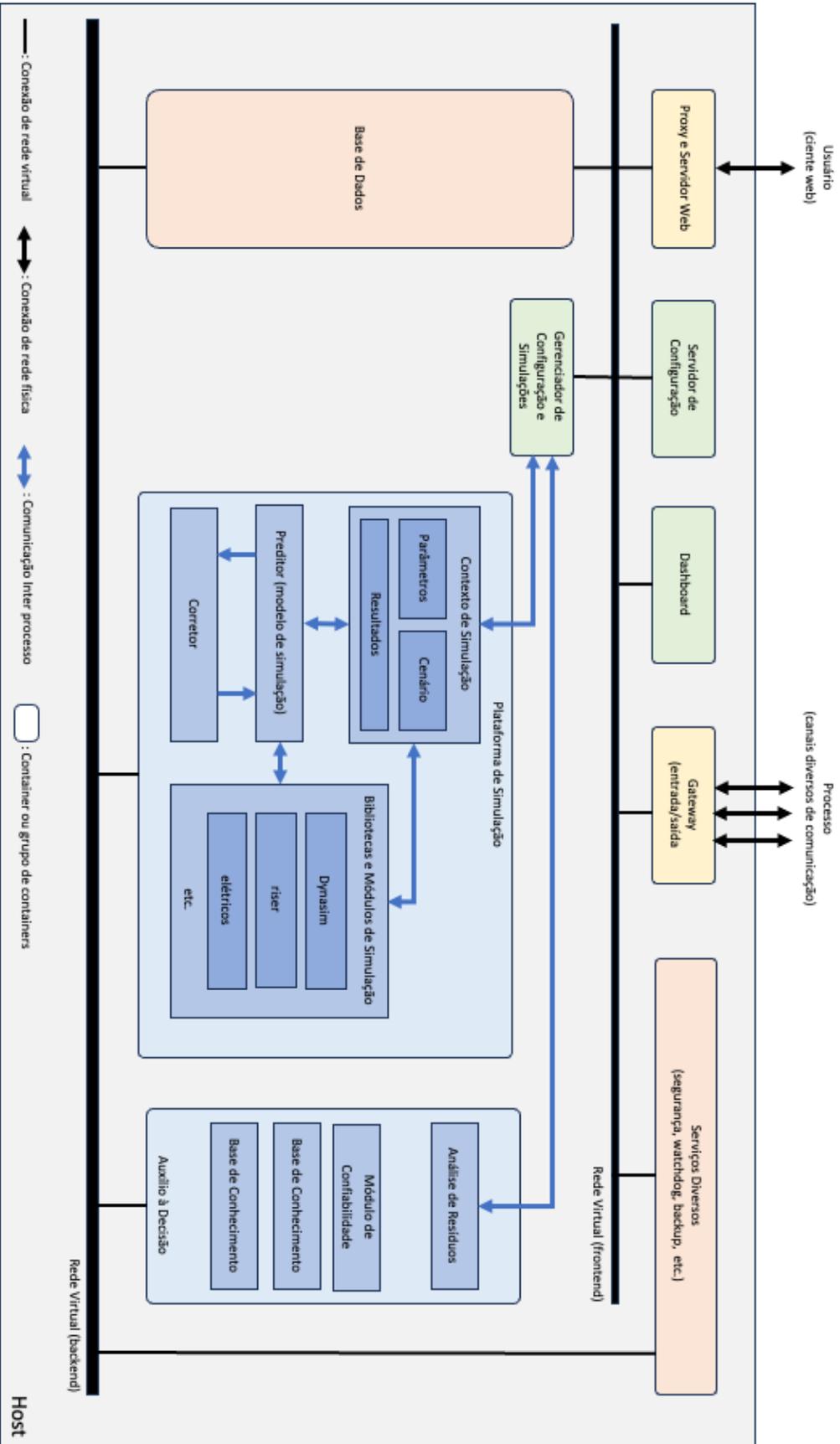


Figura 11 – Arquitetura do Gêmeo Digital (modo sombra)