



27º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore - SOBENA 2018

Rio de Janeiro, 23 a 25 de Outubro de 2018

Simulação do sistema logístico de inspeção de integridade dos risers e equipamentos submarinos

Lucas de Oliveira Castro Ferreira Rodrigues

Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ
lrcastro@poli.ufrj.br

Gabriel Premoli Monteiro

Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ
gabriel_premolimonteiro@poli.ufrj.br

Jean-David Caprace

Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ
jdcaprace@oceanica.ufrj.br

Resumo:

O crescimento da produção e exploração de petróleo em alto mar tem elevado a utilização de risers flexíveis e rígidos. A costa brasileira é repleta de unidades flutuantes conectadas as cabeças de poços através de risers. Portanto, é de grande importância o monitoramento da integridade estrutural dos risers e dos equipamentos envolvidos no escoamento do petróleo. Esse artigo tem como objetivo de analisar os custos da logística de inspeção de estruturas submarinas através de simulações computacionais considerando a frequência de inspeção, a quantidade de RSV's em operação e o estado de mar e suas limitações para diversos cenários possíveis. O estudo é realizado a partir de dados probabilísticos a respeito da frequência de inspeção das estruturas submarinas, a velocidade de inspeção contando com a subida e descida do ROV, os critérios de operação do navio e as incertezas do modelo quanto aos atrasos na operação de inspeção. Os resultados obtidos analisam as diferenças entre vários cenários de layout no leito marinho em relação aos custos totais, assim como a influência meteorológica no tempo total de operação de inspeção. Conclui-se que esse tipo de simulação abre precedente para melhoria e otimização dos recursos usados nessas operações.

1 – Introdução

As descobertas do pré-sal no leito marinho brasileiro estão entre as mais importantes do mundo contemporâneo. São compostas por grandes acúmulos de óleo leve de alto valor comercial. Para operar nessas áreas em águas ultraprofundas, precisa-se de equipamentos com um elevado grau de tecnologia e complexidade, tais como risers flexíveis e rígidos, PLET (Pipeline End Manifold) e PLEM (Pipeline End Termination), entre outros, cujas integridades devem ser mantidas para que não haver rupturas e, por conseguinte, um desastre ambiental.

Nesse sentido, a inspeção tem papel fundamental para assegurar as medidas de segurança adequadas, que, caso não sejam apropriadamente seguidas, como defendido por Santos (2016), resultam em grandes danos sociais

e ambientais. O autor relata que segundo pesquisa realizada em 2010 pelo Wall Street Journal, entre os anos de 2009 e 2010, um grande aumento de incidentes de vazamentos foi observado em diversos países, em particular o Reino Unido, Noruega e Austrália, com aumentos percentuais respectivos de 39,48 e 100% dos casos.

O trabalho de inspeção das estruturas submarinas, no entanto, não se resume ou se encerra ao fim da exploração e produção de petróleo. O descomissionamento, isto é, a fase de abandono e desativação das instalações de um campo ainda possui grande relevância e custos (como exemplificado na figura 1, retirada do trabalho feito por Pereira (2004)), sendo inerente à atividade de extração do petróleo. Nesta fase, são analisados uma série de fatores a fim de minimizar os riscos ambientais e sociais envolvidos.



Figura 1: Fases do fluxo de caixa básico de um projeto de petróleo. Onde: E - exploração; A - avaliação; D - desenvolvimento; P - produção. O eixo vertical representa o fluxo de caixa, tendo entrada de receita e custos de investimento.

Carvalho et al. (2009) mostram em seu estudo alternativas para as inspeções feitas em cascos de navios do tipo FPSO (Floating Production Storage and Offloading), ou Unidades Flutuantes de Produção, Armazenamento e Transferência, também mostrando as consequências graves da falta de inspeção, e evidenciando a falta de serviços adequados para esse porte no Brasil. Em particular, uma das técnicas discutidas está no uso de ROV's (Remotely Operated Vehicle), veículos operados remotamente, transportados por RSV's (ROV Support Vessel), abordagem que será utilizada para o presente estudo.

Aradi (2015) propõe um modelo para solucionar o problema de programar as tarefas em conjunto com o dimensionamento necessário da frota para a manutenção submarina utilizando um método de solução heurística (Simulated Anneling), por simulação e otimização.

Diversos outros estudos na área também utilizam a simulação computacional como ferramenta importante de análise e suporte a tomada de decisão (Imai e Rivera (2001); Pires Junior et al. (2006); Park et al. (2006); Ono (2007); Souza (2009); Shyshou et al (2010); Brito et al. (2010); Bassi et al(2012)), o que denota o aumento de importância e utilidade dessa ferramenta.

Este estudo tem como objetivo principal analisar as diferenças, os atrasos e os custos envolvidos no processo logístico de inspeção de estruturas submarinas, em diferentes layouts, considerando a frequência das inspeções, a quantidade de RSV's em operação e o estado de mar. Para tal, alinhou os conhecimentos das diversas normas de inspeção aplicando-as em um modelo computacional para simular a operação de inspeção em uma sequência de eventos discretos no tempo através do software Delmia Quest, da empresa Dassault Systems, que realiza simulações em 3D. Por meio dos resultados gerados espera-se ser possível utilizar essa ferramenta de simulação como auxílio para a tomada de decisões estratégicas quanto aos processos de inspeção de

equipamentos e estruturas submarinos, de forma a dimensionar a operação com o intuito de reduzir os custos totais dessa operação e, por conseguinte, os custos do sistema de exploração de petróleo. Dentre os quesitos considerados destacam-se: o tamanho da frota otimizada, os custos de time-charter e combustível e a análise de atrasos envolvidos no processo.

2 – Modelo e Metodologia

O presente trabalho propõe-se a gerar um modelo de simulação a eventos discretos que descreve a logística de operação de inspeção de um campo de petróleo, modelando-se os FPSO's e demais equipamentos presentes na produção, incluindo a região do terminal, tomada como ponto de partida dos RSV's. Como será explicado adiante, são considerados 3 cenários distintos de simulação.

Serão ainda consideradas as influências de mar, modeladas por dados estatísticos, sendo consideradas também as condições de onda de bom ou mal tempo de forma a determinar quando e as janelas de tempo onde os RSV's/ROV's irão operar.

As condições de mar também afetam a velocidade de operação dos RSV's, de forma a ter sua velocidade de serviço ajustada por um fator de correção, que varia dependendo da época do ano, como explícito pela equação 1 (Aplicação do fator de correção). Essa velocidade é adotada para todos os dias do mês de referência.

$$t_{ij} = \frac{d_{ij}}{V_s} * f_c \quad (1)$$

d_{ij} – Distância navegada
 V_s – Velocidade de serviço
 f_c – Fator de correção



Figura 2: Coeficiente de correção de tempo de navegação, por mês.

Esse fator de correção foi estimado a partir da variação do tempo médio de ciclo das

embarcações a serviço da Petrobras anualmente com base no porto de Imbetiba e está representado na figura 2.

São ainda estimados os custos de time-charte (aluguel) e de combustível com base em dados estocásticos.

A figura 3 representa o modelo de simulação adotado e implementado utilizando o software de simulação em ambiente 3D Delmia Quest, utilizando algoritmos de linguagem própria para implementar as lógicas necessárias para o modelo de simulação, presente na figura 4.

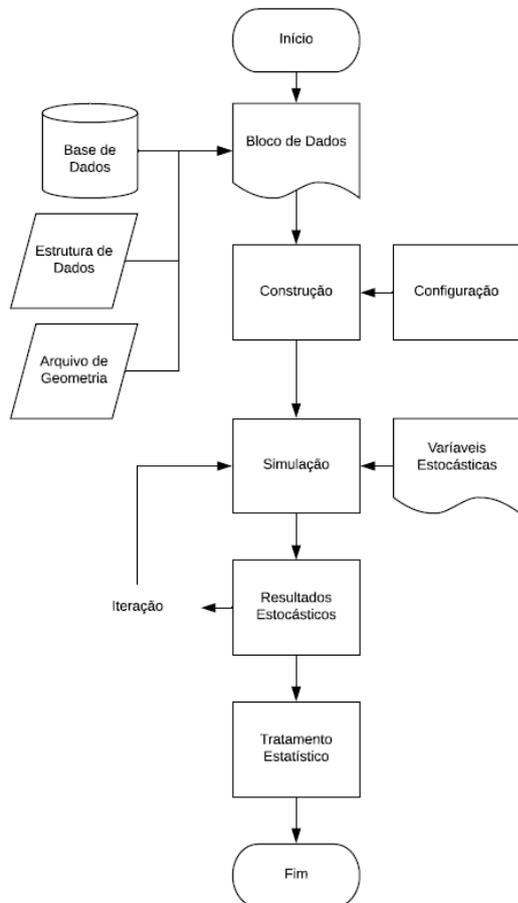


Figura 3: Modelo de Simulação estocástica utilizado.

De maneira sucinta, os blocos de dados compostos pelas bases de dados e suas estruturas, e os arquivos de geometria são configurados e utilizados durante a construção do modelo, que é corretamente configurado pela implementação dos algoritmos e lógicas adequadas e necessárias. Uma vez o modelo pronto, são rodadas as simulações utilizando sementes aleatórias distintas a fim de serem atualizados as variáveis de natureza estocástica, descritas por cada uma de suas distribuições. Os resultados uma vez tomados passam por fim pelo devido tratamento estocástico a fim das corretas

interpretações serem aplicadas. Ao final da simulação, são considerados os custos totais, são tomados os atrasos das inspeções, sendo ainda analisado se houve algum equipamento cujo tempo máximo de inspeção fora violado, e são levantadas as influências meteorológicas no modelo.

O modelo de simulação consiste em, também de maneira sucinta: a frota está inicialmente atracada no porto esperando o requerimento de inspeção. Quando este ocorre, um navio navega livremente, sem rotas pré-definidas, até o local da inspeção. Ao chegar em seu destino, dá-se o início do processo de inspeção, com o tempo de imersão do ROV e a inspeção propriamente dita. Nesse momento, se houver uma janela de mal tempo o trabalho de inspeção é interrompido e espera-se que o tempo melhore. Essa checagem é feita de hora em hora. Concluída essa etapa, o ROV emerge e retorna ao RSV. Se há ainda alguma demanda por inspeção, o RSV então navegará para o próximo elemento de demanda. Caso contrário ele retorna ao porto para atracar. A simulação é feita por um período de 30 anos.

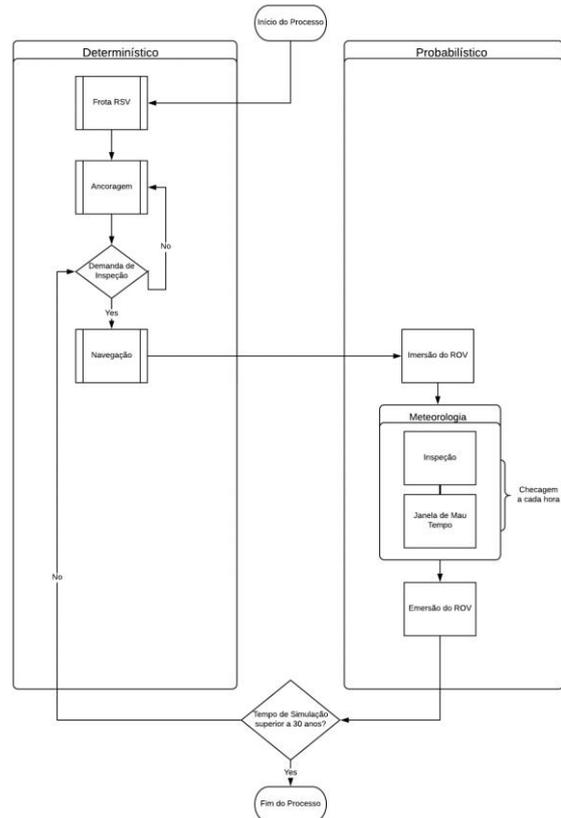


Figura 4: Fluxograma do modelo de simulação.

Tabela 1: Propriedades adotadas para o RSV. baseadas em um PSV 4500.

Tipo	Área de convés (m ²)	Velocidade de Serviço (nós)	Consumo de em velocidade de serviço (ton/dia)	Consumo em Inspeção" (ton/dia)	Consumo no porto (ton/dia)
PSV 4500	660	10,2	16,7	5,7	1,3

2.1 – Área de estudo

A área considerada no transcórper deste trabalho corresponde ao Campo de Júpiter, pertencente à camada do pré-sal, localizado a 290 km da costa do Estado do Rio de Janeiro e a 37 km a leste da área do Tupi (figura 4).

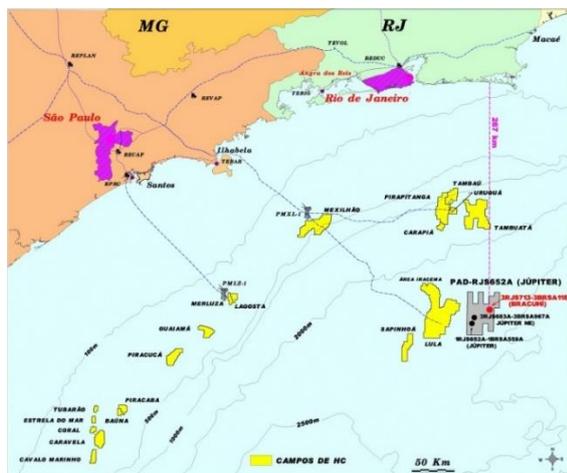


Figura 5: Banco de Imagem TN Petróleo - Bacia de Santos e Campo de Júpiter.

Essa área possui particular importância por ter grande potencial de exploração, estimado em até 8 bilhões de barris de petróleo equivalente.

2.2 – Valores e decisões de projeto

A fim de tornar o modelo viável para implementação matemática em seu atual estado são adotadas primeiramente as seguintes simplificações:

- Todos RSV's e ROV's são idênticos e possuem as mesmas velocidades de serviço;
- Algumas frequências de inspeção foram estimadas (como para separadores);
- Todas as demandas iniciais de inspeção são feitas ao mesmo tempo, sem uma ordem particular, ao início da simulação (isto é, todos os equipamentos precisam ser inspecionados quando a simulação é iniciada);

- Foi considerada a mesma profundidade média para o campo, utilizada para o cálculo dos tempos de imersão/emersão do ROV;
- Foram considerados 3 alturas de onda: 3.5, 4 e 4.5 metros;
- Há apenas um terminal de ancoragem para os RSV's;
- Não há rotas específicas de navegação (o tráfego se dá em linha reta);
- O contrato de afretamento dos RSV's é anual;
- Não foi considerado tempo máximo de permanência no mar;
- Não foi considerada a autonomia das embarcações;
- A checagem das alturas de onda (mal tempo) é realizado a cada hora;
- O consumo de combustível é o mesmo para todos os RSV's, no entanto difere para os tipos de operação (viagem, inspeção e fundeio);
- O preço do combustível é referente ao Diesel;
- Desconsideraram-se os custos portuários;
- As wellheads (cabeças de poço) e as ANM (árvores de natal) foram considerados como sendo um único equipamento. Logo, inspecionam-se os dois equipamentos de uma vez só, sem distinção de tempo;
- Desconsideraram-se alguns equipamentos submarinos: as linhas umbilicais (tubos hidráulicos, elétricos, fibra ótica, injeção química e cabos de potência), as bombas de produção e injeção, as PLET's e as PLEM's, as UTA's, os SDU's e os equipamentos mais complexos (por exemplo, os módulos de composição dos separadores).

O projeto utilizou os custos de combustível e outras características de operação, como velocidade de serviço referentes a um navio do tipo PSV 4500, por possuir porte semelhante ao

Tabela 2: Resumo esquemático das características dos equipamentos submarinos.

Tipo	Distribuição Triangular Imersão/Emersão (h)			Frequência (h)	Comprimento (m)	Distribuição Triangular Inspecção (h)		
	Min	Modo	Max			Min	Modo	max
Riser	0	0	0	43800	Variável	Comprimento*0,8	Comprimento/velocidade de inspecção	Comprimento*1,2
Flow Line	0,9*Modo	lâmina d'água/velocidade de imersão e emersão	1,1*Modo	43800	Variável	Comprimento*0,8	Comprimento/velocidade de inspecção	Comprimento*1,2
Cluster/Manifold	0,9*Modo	lâmina d'água/velocidade de imersão e emersão	1,1*Modo	26280	0	3*0,8=2,4	3	3*1,2=3,6
Production Line	0,9*Modo	lâmina d'água/velocidade de imersão e emersão	1,1*Modo	17520	Varível	Comprimento*0,8	Comprimento/velocidade de inspecção	Comprimento*1,2
WellHead/ANM	0,9*Modo	lâmina d'água/velocidade de imersão e emersão	1,1*Modo	8760	0	1*0,8=0,8	1	1*1,2=1,2
SSAO	0,9*Modo	lâmina d'água/velocidade de imersão e emersão	1,1*Modo	4380	0	6*0,8=4,8	6	6*1,2=7,2
TDP	0,9*Modo	lâmina d'água/velocidade de imersão e emersão	1,1*Modo	8760	0	2*0,8=1,6	2	2*1,2=2,4
Bombs	0,9*Modo	lâmina d'água/velocidade de imersão e emersão	1,1*Modo	2920	0	3*0,8=2,4	9	3*1,2=3,6
Pipeline Rígido	0,9*Modo	lâmina d'água/velocidade de imersão e emersão	1,1*Modo	17520	0	Comprimento*0,8	Comprimento/velocidade de inspecção	Comprimento*1,2

ROV, cujas informações necessárias não foram encontradas. As propriedades deste tipo de navio estão descritas na tabela 1.

Consideram-se as seguintes características para os ROV's:

- Velocidade de inspecção: 270 m/h;
- Velocidade de Imersão/Emersão do ROV: 500 m/h;

A tabela 2 apresenta, de maneira resumida, as características dos equipamentos mais relevantes para a simulação, descrevendo as distribuições triangulares, regidas pela equação 2 (Distribuição de probabilidade triangular), para os tempos de imersão e emersão do ROV, a frequência em que precisam ser inspecionadas e a distribuição triangular desse tempo de inspecção. Não foram descritos aqui todas as distâncias e lâminas de água pelo volume de dados e pelas diferenças de cada cenário considerado.

As frequências de inspecção foram obtidas ou estimadas segundo normas disponíveis na

literatura, como Petrobras N-1487, IRP e DNVGL.

$$\begin{cases} 0 & \text{for } x < a, \\ \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & \text{for } a \leq x < c, \\ \frac{2}{b-a} & \text{for } x = c, \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & \text{for } c < x \leq b, \\ 0 & \text{for } b < x. \end{cases} \quad (2)$$

2.2.1 – Meteorologia

Além de modificar a velocidade de serviço dos RSV's, as condições meteorológicas também podem criar janelas de mal tempo que impedem o serviço de inspecção na simulação, quando surgem ondas de alturas entre 3 e 4 metros. O presente artigo estuda os casos de 3,5, 4 e 4.5 metros de altura.

Utilizando dados de estudos de mar do PNBOIA (Programa Nacional das Boias) e o auxílio dos softwares Wave Watch III para simulação de 15 anos de comportamento para melhorar a precisão dos dados, e EasyFit para obter

as distribuições das curvas estocásticas, levantou-se os valores das constantes α e β das distribuições de probabilidade gamma (equação 3) associadas aos tempos bons e ruins.

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha x^{\alpha-1} e^{-\beta x}}{\Gamma(\alpha)} \quad (3)$$

Onde $\Gamma(\alpha)$ é a função gamma.

Tabela 3: Distribuição de probabilidade gamma de tempos bons e ruins para altura de onda de 3.5 metros.

Tempo Bom			
Altura	Trimestre	α	β
3.5	T1	8.7481	69.856
3.5	T2	1.5557	192.55
3.5	T3	1.4249	174.82
3.5	T4	2.174	185.68
Tempo Ruim			
Altura	Trimestre	α	β
3.5	T1	2.8862	4.6342
3.5	T2	2.1501	8.8165
3.5	T3	1.5621	9.4121
3.5	T4	1.4604	8.0456

Tabela 4: Distribuição de probabilidade gamma de tempos bons e ruins para altura de onda de 4 metros.

Tempo Bom			
Altura	Trimestre	α	β
4	T1	31.611	21.853
4	T2	2.5053	167.19
4	T3	3.385	132.53
4	T4	9.2639	66.125
Tempo Ruim			
Altura	Trimestre	α	β

4	T1	2.3642	1.9268
4	T2	1.2198	10.959
4	T3	1.2947	10.342
4	T4	2.3642	1.9268

Tabela 5: Distribuição de probabilidade gamma de tempos bons e ruins para altura de onda de 4.5 metros.

Tempo Bom			
Altura	Trimestre	α	β
4.5	T1	513,04	1,4075
4.5	T2	5,3779	209,12
4.5	T3	6,826	84,805
4.5	T4	4138	0,17787
Tempo Ruim			
Altura	Trimestre	α	β
4.5	T1	-	-
4.5	T2	1,3948	8,1622
4.5	T3	2,0727	4,9853
4.5	T4	-	-

2.2.2 – Custos de Time-charter e Diesel

O custo de time-charter (TC) é o aluguel pago pelo período de tempo de alocação do uma embarcação. Para fins de simplicidade, os custos considerados no transcórre deste trabalho são o TC e o combustível (Diesel). Este último é medido de acordo com o consumo dos RSV's, que varia conforme o estado de operação (viagem, fundeio ou no porto).

Utilizando a base de dados disponibilizada pela Claksonsnet para navios do tipo PSV 4000 do mercado Mar do Norte, escolhe-se o modelo geométrico de regressão a média (MRM) de Dixit & Pindyck, dado pela equação 4, de fator único, de acordo com Pinto (2009).

$$P_t = \exp \left\{ \left(\ln \bar{P} - \frac{\sigma^2}{2\eta A} \right) * (1 - e^{-\eta A \Delta t}) + \ln P_{t-1} * e^{-\eta A \Delta t} + \sigma * \sqrt{\frac{1 - e^{-\eta A \Delta t}}{2\eta A}} * N(0,1) \right\} \quad (4)$$

Fazendo-se a média e o desvio do TC de referência foram obtidas as constantes que o caracterizam, e utilizando as equações 5 levantaram-se as constantes $q_i, i \in [1, 5]$, assim gerando as curvas de comportamento futuro, representadas pela figura 6.

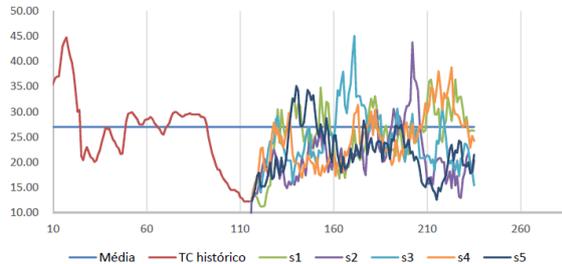


Figura 6: MRM - Comportamento do Time-charter para PSV 4000.

Pelo mesmo critério de MRM e utilizando os dados históricos fornecidos pelo banco de dados disponibilizado pela Bunkerindex a partir de março de 2009 até dezembro de 2017, gerou-se a distribuição randômica e satisfatória que governa a série temporal do preço do Diesel.



Figura 7: Série histórica do preço do Diesel.

As constantes utilizadas nas equações 5 (Cálculo das constantes do MRM de Dixit & Pindyck e constantes do TC) para esse critério foram:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_1 = \left(\ln \bar{P} - \frac{\sigma^2}{2\eta A} \right) \\ q_2 = (1 - e^{-\eta A \Delta t}) \\ q_3 = q_1 * q_2 = 0,3230995 \\ q_4 = e^{-\eta A \Delta t} = 0,8962638 \\ q_5 = \sigma * \sqrt{\frac{1 - e^{-\eta A \Delta t}}{2\eta A}} = 0,1061013 \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_3 = 0,004198 \\ q_4 = 0,9993663 \\ q_5 = 0,0091118 \end{array} \right.$$

2.3 – Cenários

Tabela 6: Casos considerados para simulação.

Simulação	Cenário	Altura de onda (m)
1	1	3.5
2	1	4
3	1	4.5
4	2	3.5
5	2	4
6	2	4.5
7	3	3.5
8	3	4
9	3	4.5

Para efeitos de comparação e análise, são considerados 3 diferentes cenários, explicitados em seguida, de diferentes layouts, que serão utilizados nos modelos de simulação. Cada um desses cenários é simulado por 50 iterações para cada altura de onda consideradas (3.5, 4 e 4.5 metros de altura). Esse número de iterações fora obtido utilizando a metodologia descrita por Chwif e Medina (2013).

A tabela 6 apresenta a matriz de simulações, composta de no total 9 casos distintos, pela composição de 3 alturas de ondas para cada um dos 3 cenários.

Vale ressaltar que, para efeitos de simplificação são desconsideradas as estruturas de PLET e PLEM.

2.3.1 – Cenário 1

O primeiro cenário se resume ao prospecto do campo em estudo. Listam-se suas principais características:

- Lâmina d'água médio: 2300 metros;
- 4 FPSO's
- 66 poços produtores, 22 poços injetores de água e 3 poços injetores de gás;
- 12 clusters (manifolds) de produção e 4 de injeção, 66 árvores de natal molhada (ANM) de produção, 22 ANM de injeção de água e 4 ANM de injeção de gás;

- Distancia da costa (localização): 300 km

Utilizando as informações disponibilizadas para este estudo, e com o auxílio do software Webplot Digitizer, gerou-se a figura 9 que descreve a distribuição de todos os elementos considerados nesse cenário.

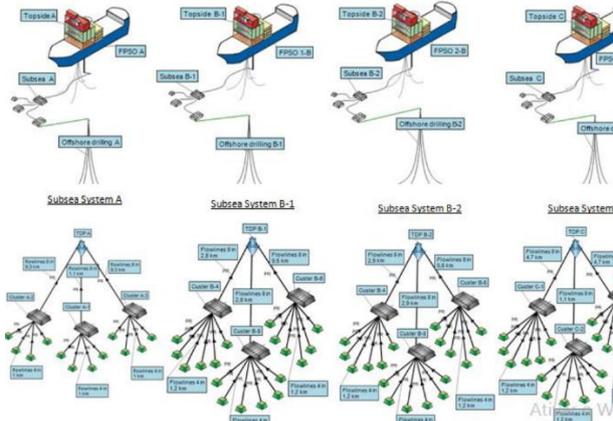


Figura 8: Cenário 1 - 4 FPSO's.

A figura 8 representa os 4 FPSO's, e foi gerada apenas para visualização pelo software QUESTOR.

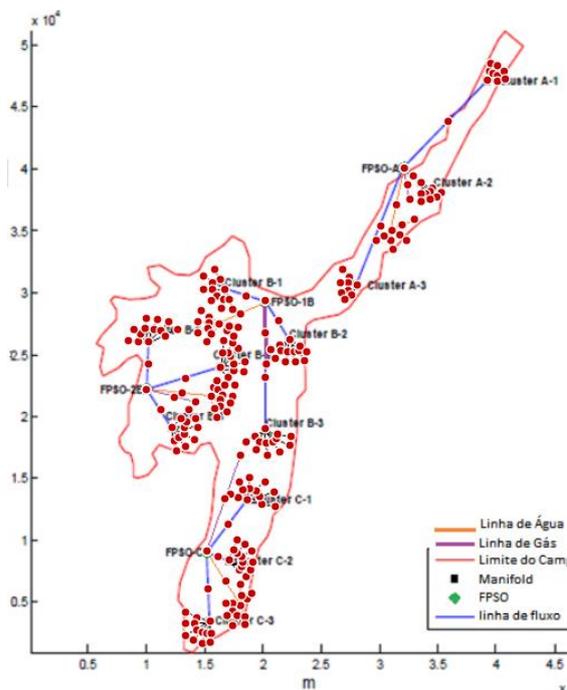


Figura 9: Layout do modelo considerado para o cenário 1.

A figura 10 ilustra ainda o sistema de injeção de gás e água dos FPSO's.

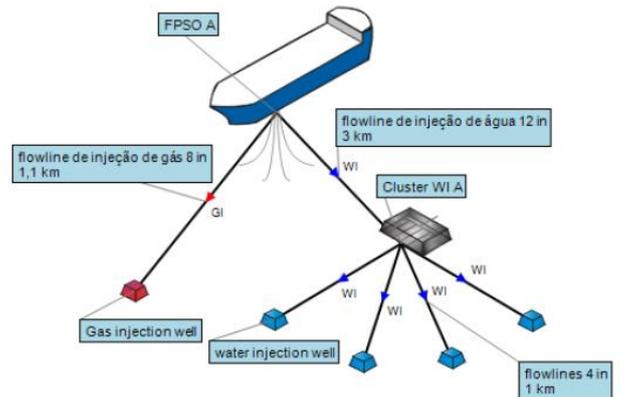


Figura 10: Sistema de injeção de água e gás do FPSO A.

2.3.2 – Cenário 2

O Segundo cenário se caracteriza por ser híbrido. Suas principais características estão listadas:

- Lâmina d'água no campo: 2300 metros;
- 66 poços produtores, 22 poços injetores de água (FPSO 1 com 10 e FPSO 2 com 12) e 3 poços injetores de gás (FPSO 1 com 1 e FPSO 2 com 2);
- 12 manifolds de produção (6 para cada FPSO) e 18 de injeção de água;
- Distância da costa (localização): 300 km

O arranjo submarino associado aos FPSO's 1 e seus 3 separadores e o sistema de injeção de água, com suas respectivas bombas está ilustrado na figura 11. É importante ressaltar que essa operação não fará parte da simulação e que a figura descreve apenas metade do sistema do campo.

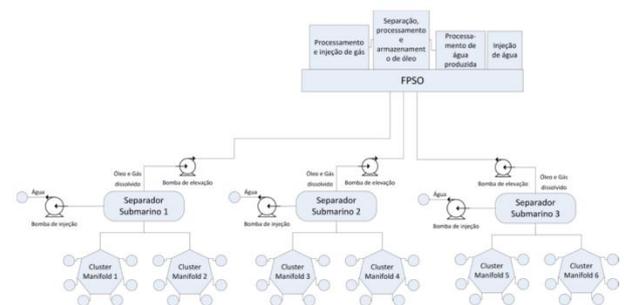


Figura 11: Posição do FPSO e manifolds.

Assim como no cenário 1, utilizando o QUESTOR gera-se a figura 12 de visualização do arranjo híbrido do campo.

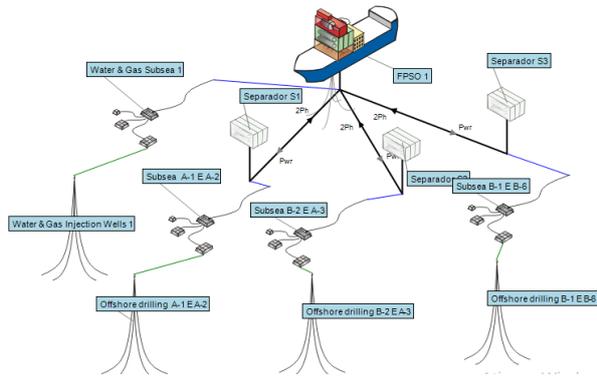


Figura 12: Cenário 2 - cenário híbrido.

A figura 13 também gerada por Webplot Digitizer apresenta o layout do campo para o cenário 2, contendo todos os elementos importantes.

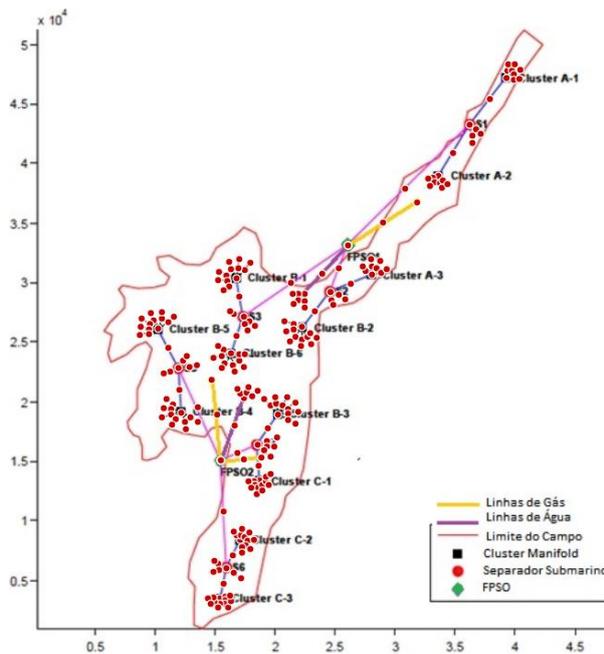


Figura 13: Layout do modelo considerado para o cenário 2.

O layout do sistema de separadores está também representado pela figura 14.

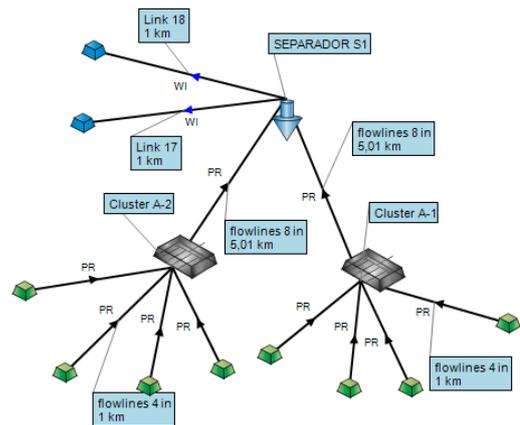


Figura 14: Layout do sistema de separadores submarinos, referentes ao separador S1.

Já a figura 15 mostra o layout dos sistemas de injeção e FPSO.

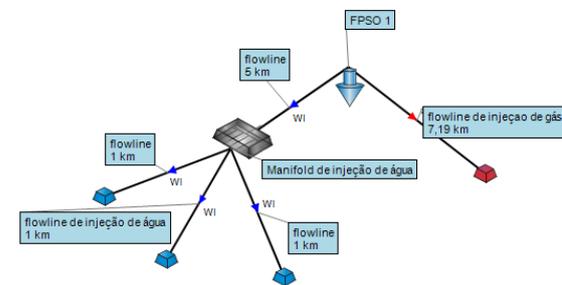


Figura 15: Layout do sistema de injeção de água e gás do FPSO 1.

2.3.3 – Cenário 3

O cenário 3 é descrito por ser do tipo *sub-sea to shore*, onde não são incluídos FPSO's. Esse cenário se assemelha ao cenário 2 por possuir os mesmos poços de produção.

Além dos 22 poços de injeção de água, consideram-se dois mais, a fim de completar o sistema. Cada pipeline nesse cenário é conectado a um banco de 3 bombas, considerados cada qual um único equipamento para efeitos de simulação, mas que são compostos por 3 bombas multifásicas e mais 1 bomba reserva, totalizando em 24 bombas.

A figura 16 representa o layout levantado utilizando o Webplot Digitizer. Os pontos em lilás são os pontos relativos ao pipeline e, por ser muito longos, não foram completamente ilustrados pelo software, o que acarretou na necessidade de extrapolar as demais posições até a costa.

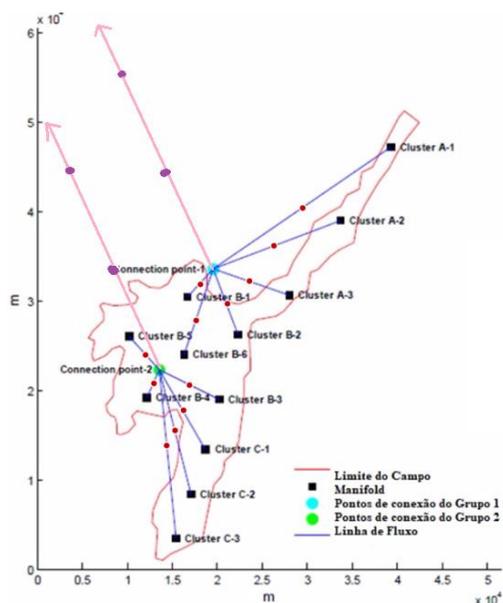


Figura 16: Layout do modelo considerado para o cenário 3.

3 – Resultados e discussão

O modelo de simulação foi previamente validado antes de serem tomados os resultados aqui apresentados.

Para isso, gerou-se uma série de 20 iterações com 1 RSV e altura de onda de 3.5m para colocar em prova o modelo desenvolvido nos quesitos de tempo de viagem, inspeção, imersão/emersão e custos. Como esses resultados prévios estavam dentro do esperado e do aceitável, considerou-se válido o modelo.

Ao final das simulações, a primeira observação relevante fora de que, apesar de usar apenas 1 RSV, nenhum equipamento teve o tempo máximo de 1 ano de atraso (sem ser inspecionado) ultrapassado, o que indica que apenas 1 navio seria suficiente para fazer a inspeção do campo, considerando todas as simplificações impostas. Além disso, todos os equipamentos ao final da simulação tiveram todas as demandas de inspeção atendidas ao longo dos 30 anos considerados.

Ainda vale pontuar que apesar de não existir para os custos um parâmetro comparador real, serão analisadas as influências entre os cenários de simulação para fins comparativos.

3.1 – Resultados para o cenário 1

De acordo com os gráficos presentes na figura 17, 18 e 19, observa-se que as condições meteorológicas pouco influenciaram na programação de inspeção para esse cenário durante a janela de 30 anos, para todos os casos de altura de onda.

Processo de Inspeção (Altura de onda 3.5 m)

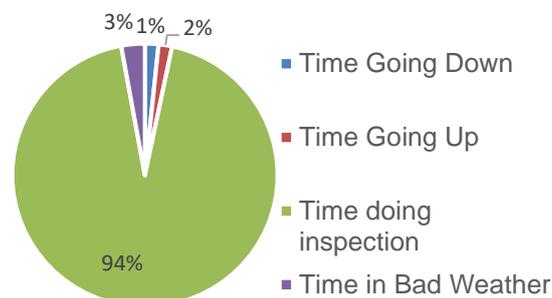


Figura 17: Influência meteorológica para o caso de altura de onda de 3.5 metros para o cenário 1.

Processo de Inspeção (Altura de onda 4.0 m)

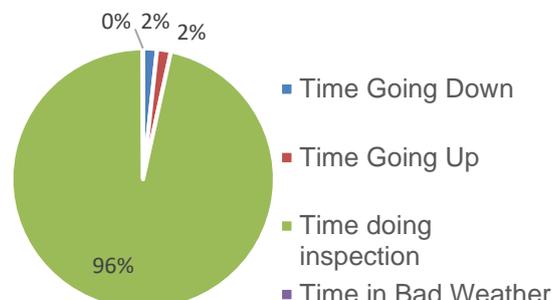


Figura 18: Influência meteorológica para o caso de altura de onda de 4 metros para o cenário 1.

Processo de Inspeção (Altura de onda 4.5 m)

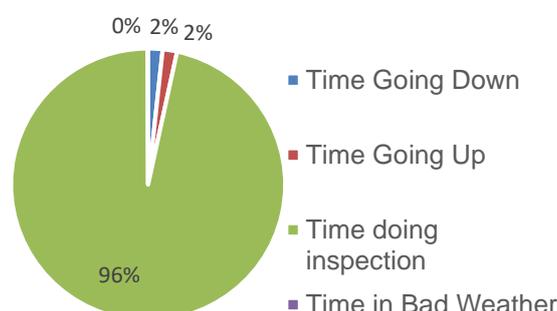


Figura 19: Influência meteorológica para o caso de altura de onda de 4.5 metros para o cenário 1.

Os custos de TC e de Diesel obtidos estão ilustrados nos gráficos presentes nas figuras 20, 21 e 22, referentes respectivamente aos casos de altura de onda de 3.5, 4 e 4,5 metros.

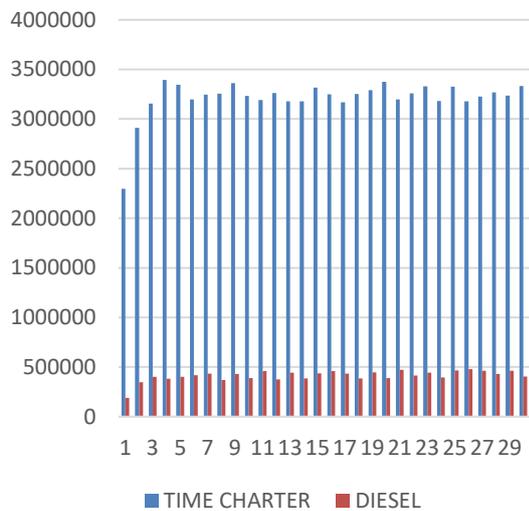


Figura 20: Custos anuais do processo de inspeção para o caso de altura de onda de 3.5 metros para o cenário 1.

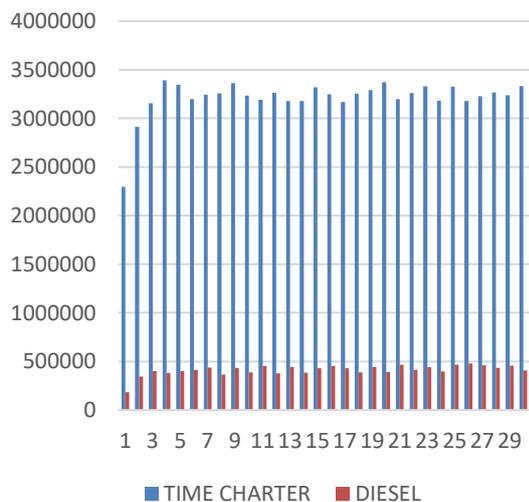


Figura 21: Custos anuais do processo de inspeção para o caso de altura de onda de 4 metros para o cenário 1.

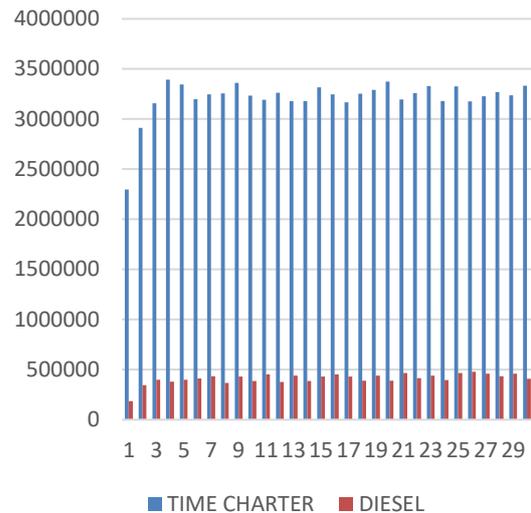


Figura 22: Custos anuais do processo de inspeção para o caso de altura de onda de 4.5 metros para o cenário 1.

3.2 – Resultados para o cenário 2

Assim como no cenário 1, ao analisarmos os gráficos presentes nas figuras 23, 24 e nota-se que a influência meteorológica, apesar de maior, ainda é pequena no processo de inspeção.

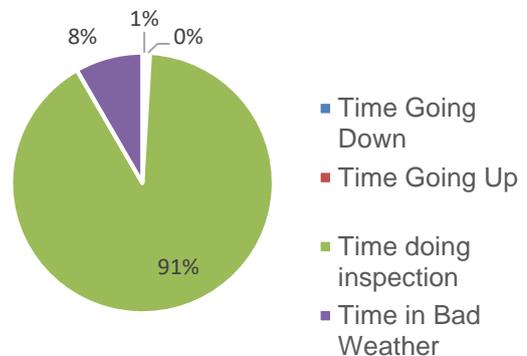


Figura 23: Influência meteorológica para o caso de altura de onda de 3.5 metros para o cenário 2.

Os custos obtidos para os casos de 3.5 e 4 metros de altura de onda estão presentes nos gráficos das figuras 25 e 26.

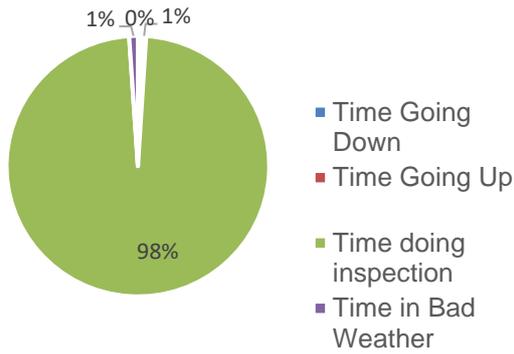


Figura 24: Influência meteorológica para o caso de altura de onda de 4 metros para o cenário 2.

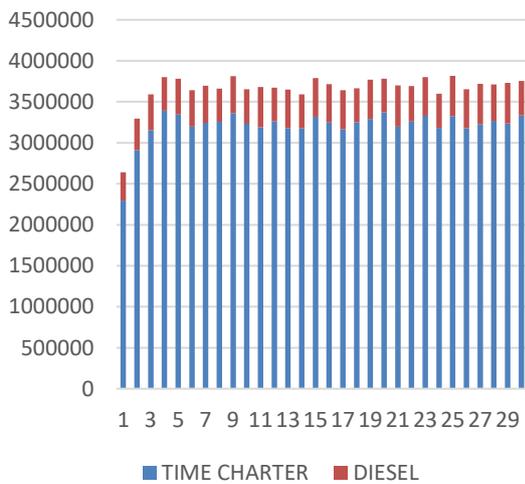


Figura 25: Custos anuais do processo de inspeção para o caso de altura de onda de 3.5 metros para o cenário 2.

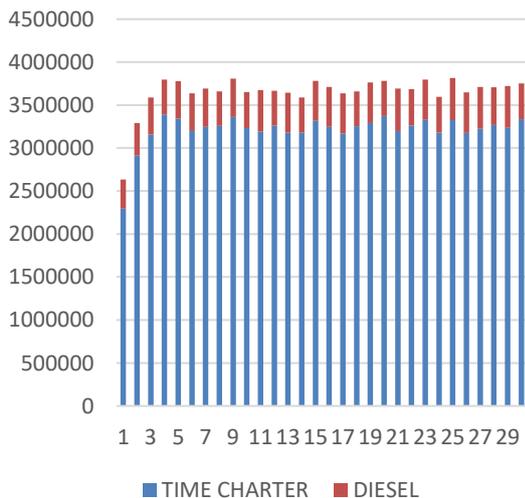


Figura 26: Custos anuais do processo de inspeção para o caso de altura de onda de 4 metros para o cenário 2.

3.3 – Resultados para o cenário 3

O cenário 3 foi o que apresentou uma janela de mal tempo mais influente dentre todos os outros, mas ainda assim pequena, como pode ser observado nos gráficos presentes nas figuras 27 e 28.

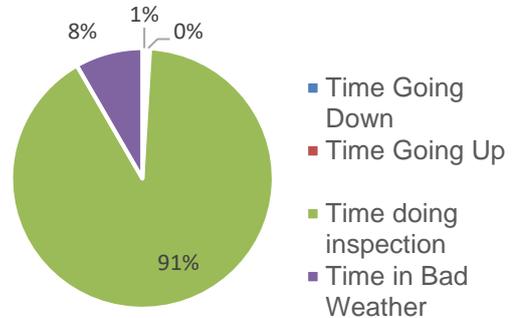


Figura 27: Influência meteorológica para o caso de altura de onda de 3.5 metros para o cenário 3.

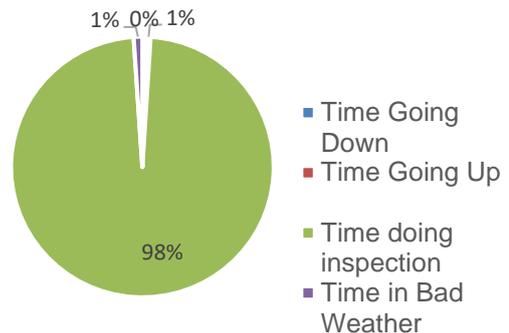


Figura 28: Influência meteorológica para o caso de altura de onda de 4 metros para o cenário 3.

Os custos totais desse cenário se encontram exibidos nos gráficos das figuras 29 e 30.

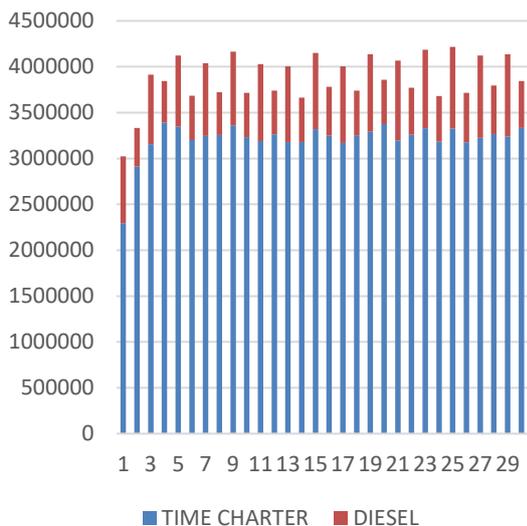


Figura 29: Custos anuais do processo de inspeção para o caso de altura de onda de 3.5 metros para o cenário 3.

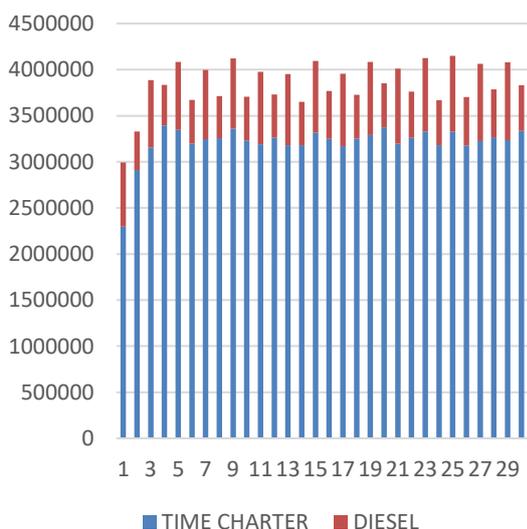


Figura 30: Custos anuais do processo de inspeção para o caso de altura de onda de 4 metros para o cenário 3.

3.4 – Comparação dos resultados

As figuras 30, 31, 32, 33 e 34 representam gráficos importantes para a análise do modelo criado. São eles, respectivamente, a média de atraso de inspeção, o tempo mínimo de atraso, o tempo máximo de atraso, a soma total dos atrasos, o desvio padrão desses valores e a média do tempo de inspeção. São agrupados os dutos (linhas de escoamento) dos demais equipamentos.

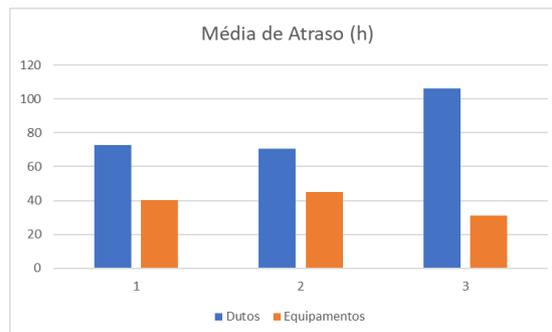


Figura 31: Média de atraso em horas entre os cenários considerados.

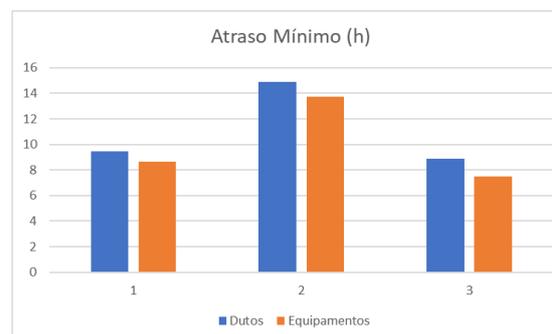


Figura 32: Atraso mínimo relatado em cada cenário considerado.

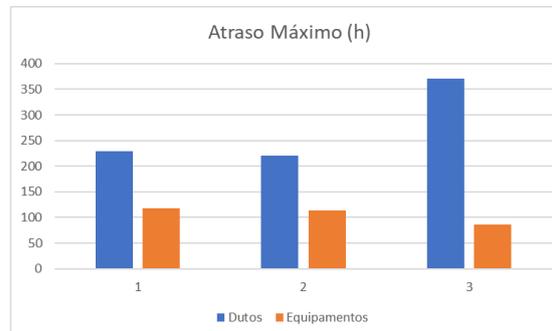


Figura 33: Atraso máximo relatado em cada cenário considerado.

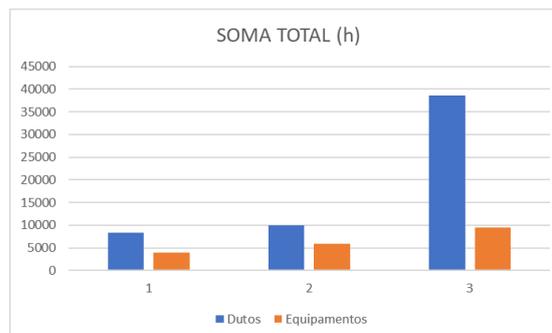


Figura 34: Atraso total em cada cenário considerado.

Cenário 1

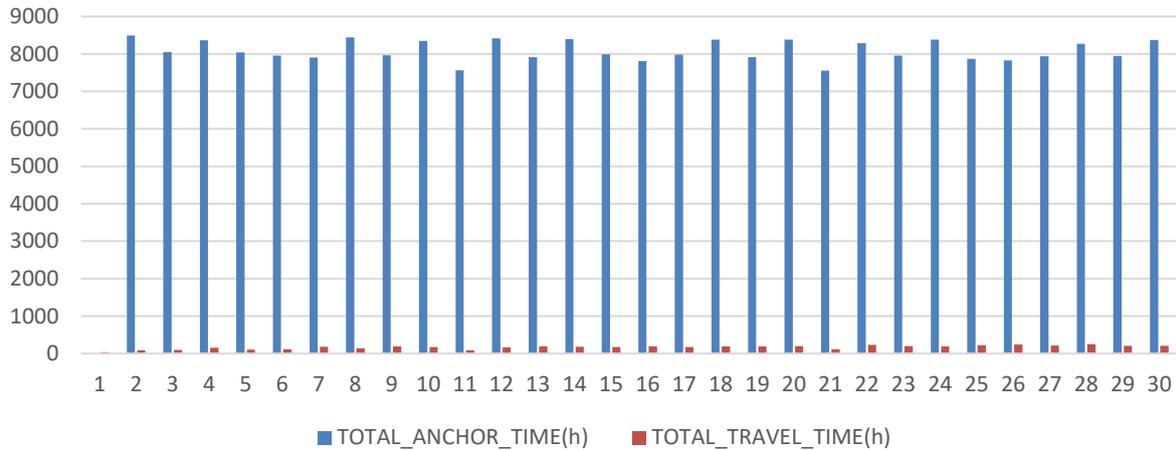


Figura 37: Comparação entre os tempos de fundeio e viagem para o cenário 1.

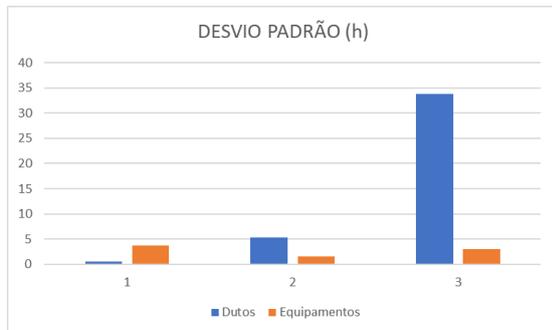


Figura 35: Desvio padrão dos atrasos em cada cenário considerado.

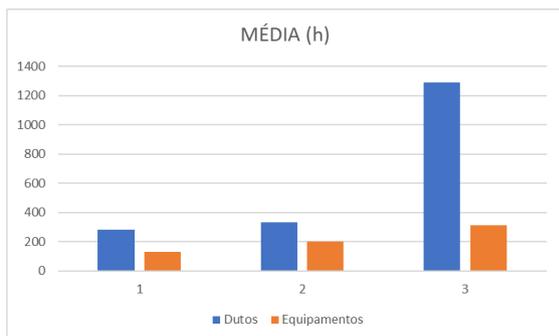


Figura 36: Média dos tempos de inspeção para cada cenário considerado.

Analisando os gráficos das figuras 31, 32 e 33, nota-se que o cenário 3 é o que possui a maior diferença entre os atrasos na inspeção, resultado da grande quantidade de dutos, muito maior nesse cenário.

Não obstante, ao analisarmos os gráficos das figuras 34, 35 e 36, conclui-se que os atra-

tos não tiveram uma magnitude tão significativa, tendo em vista a grande diferença dos atrasos observados entre os cenários, de forma a demonstrar que o cenário *shore to shore* é uma boa prospecção entre os 3 cenários estudados.

As figuras 37, 38 e 39 apresentam os tempos de fundeio para fins de comparação entre os cenários considerados. Ao serem analisados, observa-se que o cenário 3 é o que possui maior variação entre os anos, resultado do período de inspeção dos quase 600 km de dutos de escoamento. Esse cenário também foi que, em magnitude, teve o menor tempo em ancoragem, pelo mesmo motivo.

4 – Conclusões e trabalhos futuros

Observando os resultados obtidos e presentes na seção 3, podemos concluir que não houveram mudanças significativas entre os custos dos cenários, e também pode-se concluir que as influências meteorológicas tiravam magnitude praticamente desprezíveis quando comparado ao tempo de simulação de 30 anos. Do-
 ravante, nesse campo de estudo as paradas os

Para trabalhos futuros, vale lembrar que não foi adotada nenhuma ordem específica para as operações de inspeções, tendo no momento o modelo de FIFO, que pode não ser eficiente para todos os momentos e cenários. Logo, faz-se interessante o desenvolvimento de algoritmos e lógicas que procurem otimizar o trajeto performado pelo RSV para as tarefas de

Cenário 2

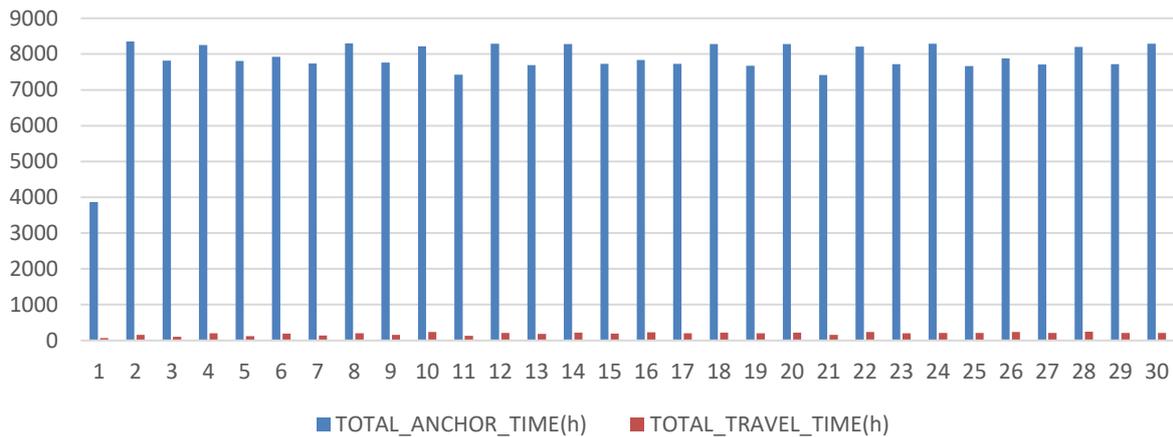


Figura 38: Comparação entre os tempos de fundeio e viagem para o cenário 2.

custos relacionados à essas paradas da operação não são relevantes.

Ao analisar os atrasos, de forma a agrupar as estruturas submarinas em dutos e demais equipamentos, observou-se que, em geral, esses primeiros são os que possuem maior relevância. Quanto ao cenário 3, os atrasos máximos obtidos foram ainda maiores quando comparados com os outros dois outros, em virtude do número muito maior de dutos. Estudos futuros, com outros tipos de equipamentos e metodologias de inspeção podem ter seus resultados aquém a estes.

inspeção.

Segundo os gráficos gerados presentes nas figuras 36, 37 e 38, nota-se que o RSV, para esse modelo com as simplificações anteriormente descritas, passa a maior parte de seu tempo ocioso. Assim, uma futura análise poderia se beneficiar da mesma embarcação operar em dois ou mais prospectos ao mesmo tempo, a fim de otimizar o time-charter.

Outras melhorias citadas são as de tornar o modelo mais complexo, ao acrescentar fatores limitantes como tempo máximo de mar

Cenário 3

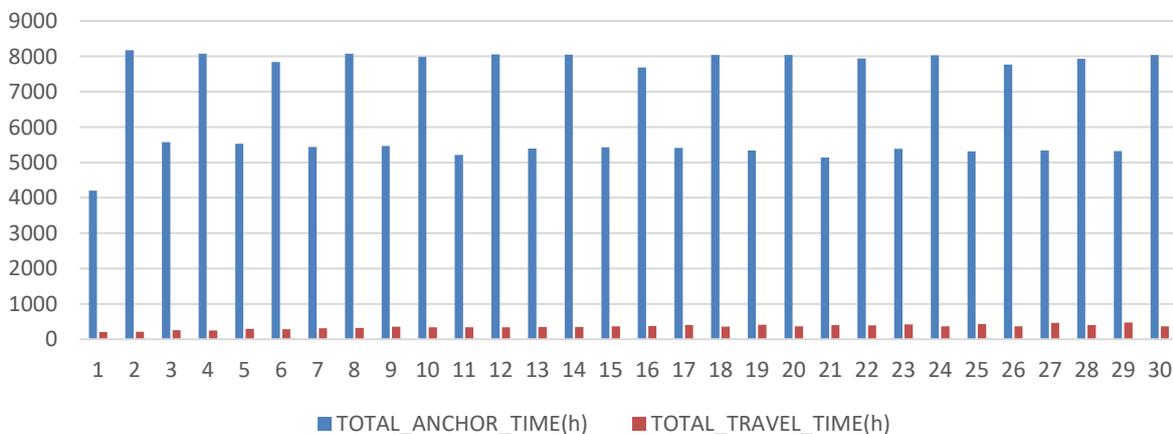


Figura 39: Comparação entre os tempos de fundeio e viagem para o cenário 3.

e a autonomia da embarcação. Também podem ser inclusos as estruturas que foram deixadas de lado para fins de simplicidade neste trabalho, como os PLET e PLEM, umbilicais de distribuição de energia, as diversas bombas de elevação dentre outros equipamentos igualmente complexos. Implementar outras formas de inspeção além do ROV, e utilizar as frequências reais de inspeção dos equipamentos que aqui foram estimados são também importantes paços para melhorar a análise no futuro. Isso tudo possibilitaria obter resultados mais precisos e de acordo com a realidade, sendo de ainda de mais valia como ferramenta prática e confiável para o auxílio da tomada de decisão estratégica na área de exploração de petróleo.

5 – Referências

- ARADI, T. C., “Planejamento de Operações de manutenção submarina”, Dissertação de mestrado em engenharia da escola politécnica da universidade de São Paulo -p.116. São Paulo, 2015.
- BASSI, H.V., FILHO, V.J.M.F, BAHIENSE, L. Planning and scheduling a fleet of rigs using simulation-optimization, *Computers and industrial Engineering*. 63 (2012) 1074-1088
- BRITO, T.B.; SILVA, R.C.S.; BOTTER, R.C.; PEREIRA, N.N.; MEDINA, A.C. “Discrete event simulation combined with multi-criteria decision analysis applied to steel plant logistics system planning.” [s.l.] Universidade de São Paulo, SP, Brasil, 2010.
- CARVALHO, A. A.; PEREIRA, M. C.; BOUCHONNEAU, N.; FARIAS, J. A. B.; BRITO, J. L. F. “Inspeção submarina: perspectivas e avanços”, *Rev. Tecnol. Fortaleza*, v. 30, n. 2, p. 198-209, dez. 2009.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. “Modelagem e simulação de eventos discretos”. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, p. 8-13; 25-29; 116-122, 2013.
- IMAI, A.; RIVERA, F. “Strategic fleet size planning for maritime refrigerated containers.” *Maritime Policy & Management*, v.28, n 4, p. 361-374, 2001.
- ONO, R.T. “Modelagem Sistêmica e Planejamento Logístico da Cadeia de Suprimentos de Petróleo”. 2007. P.198. Tese (doutorado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2007
- PARK, C., J.-C. PARK, G.-G. BYEON, H.-G. KIM, and J. KIM. "Steel Stock Management on the Stockyard Operations in Shipbuilding: A Case of Hyundai Heavy Industries." *Production Planning & Control*, páginas 1-12, 2006.
- PEREIRA, F. A. P., 2004. Metodologia de análise econômica de projetos de óleo e gás. Monografia, Engenharia de Produção - Escola de Engenharia, UFRJ: Rio de Janeiro.
- PINTO, C.L.B. Modelagem de Opções Reais com Processos de Reversão à Média em Tempo Discreto: Uma Aplicação na Indústria Brasileira de Etanol, PUC-Rio, RJ, Brasil, 2009.
- PIRES JUNIOR, F. C. M. e DA SILVA, C. T., “Potencial de Aplicação de Simulação de Processos Industriais a Construção Naval”, 23º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, *Construção Naval e Offshore*, 1-12, 2006.
- SANTOS, W.R.; A IMPORTÂNCIA DA INSPEÇÃO EM DUTOS SUBMARINOS NA PREVENÇÃO DE RISCOS AMBIENTAIS EM ÁGUAS OCEÂNICAS. Apresentado no Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC’2016 – Foz do Iguaçu, Brasil. 29 de agosto a 1 de setembro de 2016.
- SILVA, R. C. DOS S. “Análises de tradeoff em sistemas de transporte aquaviário com simulação de eventos discretos”. – Universidade de São Paulo, SP, Brasil, 2012.
- SOUZA, T. F., “A simulação a eventos discretos como ferramenta de apoio à tomada de decisão em empresas do ramo de mineração [manuscrito] : aplicação em uma unidade da Yamana Gold”, 2009