



Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Escola Politécnica & Escola de Química  
Programa de Engenharia Ambiental

MODELAGEM DINÂMICA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS  
OLEOSOS RESULTANTES DAS AÇÕES DE RESPOSTA AO  
DERRAMAMENTO DE ÓLEO NA EXPLORAÇÃO E  
PRODUÇÃO OFFSHORE DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL

Marcelo Cruz dos Santos

Orientadores: Claudinei de Souza Guimarães, D Sc. e  
Isaac José Antonio Luquetti dos Santos, D. Sc. (“In memorian”).

Rio de Janeiro  
2024

Marcelo Cruz dos Santos

MODELAGEM DINÂMICA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS  
OLEOSOS RESULTANTES DAS AÇÕES DE RESPOSTA AO  
DERRAMAMENTO DE ÓLEO NA EXPLORAÇÃO E  
PRODUÇÃO OFFSHORE DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL

Tese de Doutorado submetida ao Corpo Docente do Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Ambiental.

Orientadores:

Claudinei de Souza Guimarães, D Sc.

Isaac José Antonio Luquetti dos Santos, D. Sc. (“In memorian”).

Rio de Janeiro

2024

# MODELAGEM DINÂMICA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS OLEOSOS RESULTANTES DAS AÇÕES DE RESPOSTA AO DERRAMAMENTO DE ÓLEO NA EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO OFFSHORE DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL

Marcelo Cruz dos Santos

Tese de Doutorado submetida ao Corpo Docente do Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Ambiental.

Orientado por: Claudinei de Souza Guimarães, D. Sc.  
Isaac José Antonio Luquetti dos Santos, D. Sc. (“in memorian”)

Aprovada pela Banca:

Documento assinado digitalmente  
 CLAUDINEI DE SOUZA GUIMARAES  
Data: 05/12/2024 13:17:12-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



Presidente/Orientador  
Prof. Claudinei de Souza Guimarães, D.Sc.  
EQ/UFRJ, Brasil.

Alejandro David Martinez Amariz, D.Sc.  
Universidad de Santander, Colômbia.

Documento assinado digitalmente  
 FELIPE SOMBRA DOS SANTOS  
Data: 07/12/2024 06:48:36-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente  
 GEORGE VICTOR BRIGAGAO  
Data: 07/12/2024 02:51:02-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Felipe Sombra dos Santos, D.Sc.  
EQ/UFRJ, Brasil.

George Victor Brigagão, D.Sc.  
POLI/UFRJ, Brasil.

Documento assinado digitalmente  
 MARCOS BARRETO DE MENDONÇA  
Data: 06/12/2024 18:40:42-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

PAULO  
COUTO:8891555797  
2  
  
Digitally signed by PAULO COUTO:88915557972  
DN: cn=BR, ou=ICP-Brasil, ou=VideoConferência,  
ou=11871388002247, ou=Secretaria da Receita  
Federal do Brasil - RFB, ou=IFB e-CPF A3, ou=(em  
branco), cn=PAULO COUTO:88915557972  
Date: 2024.12.06 16:24:23 -03'00'

Marcos Barreto de Mendonça, D.Sc.  
POLI/UFRJ, Brasil.

Paulo Couto, D.Sc.  
COPPE/UFRJ, Brasil.

Rio de Janeiro

2024

### CIP – Catalogação na Publicação

Cruz dos Santos, Marcelo  
C314m      MODELAGEM DINÂMICA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS  
OLEOSOS RESULTANTES DAS AÇÕES DE RESPOSTA AO  
DERRAMAMENTO DE ÓLEO NA EXPLORAÇÃO E  
PRODUÇÃO OFFSHORE DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL  
/ Marcelo Cruz dos Santos. – Rio de Janeiro, 2024.  
221 f.

Orientador: Claudinei de Souza Guimarães.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
Escola Politécnica, Escola de Química, Programa de Pós-  
Graduação e Engenharia Ambiental, 2024.

1. Dinâmica de sistemas. 2. Resíduos oleosos. 3. Vazamentos de óleo. 4. Petróleo e gás natural. 5. Gestão de resíduos.
- I. de Souza Guimarães, Claudinei, Orient. II. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos Pelo autor, sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto – CRB-7/6283.

## DEDICATÓRIA

“In memorian” a meu avô materno Paschoal, que em nome da vida e da liberdade, negando-se a participar das lutas colonialistas portuguesas na África, há mais de um século reescreveu a história dos grandes navegantes portugueses e atravessou todo o vasto Oceano Atlântico como que apenas para conhecer sua Maria, minha avó, com quem nos abençoou com Celeste, minha amada mãe.

“In memorian” a minha avó materna Maria, de quem guardo com carinho e saudade sua doçura no trato não apenas com nossa família, mas também com qualquer pessoa ainda que estranha que dela se aproximasse em necessidades. Dela aprendi o poder não apenas da caridade, mas da generosidade.

“In memorian” a minha mãe Maria Celeste, que sempre foi um exemplo de vida e de dedicação à família. Foi mãe, foi esposa, foi filha, foi irmã, foi o que melhor dela poderia se esperar em família. Mas foi além, e dedicou toda uma vida a educar, essa arte tão difícil e mal reconhecida em nosso amado Brasil. Ensinou as letras, ensinou os números, ensinou a arte que libertou tantos da escravidão das trevas da ignorância, homens e mulheres que ainda hoje devem guardar dela uma lembrança suave e amorosa como ela sempre foi.

“In memorian” a meus avós paternos Manuel e Ludovina, com os quais não tive a honra de conviver, mas que por meio de meu pai aprendi a amar e respeitar.

A meu amado pai Elmir, que Deus generosamente mantém a nosso lado com toda sua força e vitalidade, aos 88 anos de vida ainda ativa e produtiva. Dedicado ao longo de toda sua vida às artes, músico, cantor e compositor por excelência. Uma alma generosa que sempre soube compartilhar com seus irmãos em Cristo tudo aquilo que lhe foi tão generosamente concedido pelo Senhor. Meu mestre, meu amigo e aquele de quem aprendi não por palavras, mas por atitudes, que a busca pelo conhecimento e crescimento pessoal deve ser uma jornada permanente. Que eu saiba sempre honrar seu nome e trajetória de vida.

A minhas amadas Cléa e Athena, esposa e filha, que são a melhor parte de mim, a quem eu me dedico com amor, carinho e respeito e por quem vivo com alegria. Vocês sempre foram e continuam sendo meu suporte, minha motivação, minha alegria, e inspiração. Viver pela família, honrar sua família, este sim é o grande legado que um homem de bem deve fazer ecoar pela eternidade. Peço a Deus que eu seja sempre digno de tamanha honraria que é tê-las a meu lado.

**QUI CUM HONORE VIVIT ET PUGNAT,  
GLORIAM IN MORTE MERETUR.**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pai, todo poderoso, Alfa e Ômega a quem me submeto à sua vontade, toda a honra e toda a glória.

O desafio de escrever uma Tese de Doutorado é bem mais do que tentar avançar os limites do conhecimento, de chegar a territórios incertos e ainda não conquistados. O grande desafio é ultrapassar seus próprios limites pessoais, sair da “zona de conforto” e se arriscar em uma longa jornada que a todo o tempo oscila entre o sucesso e o fracasso, fracasso esse que precisa ser entendido como um bom companheiro de jornada, pois é dele que muitas vezes ainda que em meio à dúvidas e frustração surgem as boas ideias, os novos rumos que nos levam ao passo final.

Portanto, não é esse passo final aquele que poderia ser considerado o mais importante, o vitorioso. A jornada, ela sim, é o grande prêmio. É a jornada, com seus desafios, seus avanços e retrocessos, suas alegrias e frustrações, com a pessoa em quem você se torna, é ela que traz em si a verdadeira glória da conquista.

Foi uma longa jornada, desde setembro de 2018, entremeada com momentos incertos e dificuldades que muitas vezes furtaram minhas forças, de forma que minha fraqueza humana muitas vezes me fez pensar não ter forças para seguir em frente. Muitas vezes meu olhar não encontrava os caminhos ou as palavras, de forma que em cada um daqueles momentos eu não sabia para onde seguir. Mas hoje, mais que nunca, eu percebo que jamais estive sozinho, pois eu sempre tive a meu lado um anjo a quem um dia decidi dedicar a minha vida com amor e honra, a quem dedico este trabalho e a quem no dia a dia renovo meu amor e dedicação. Minha esposa Cléa é minha força, minha razão e grande responsável pela conclusão deste trabalho. Foi ela que me ergueu nos momentos de fraqueza, que me alegrou nos momentos de tristeza e em especial, foi ela quem me deu a maior alegria de nossa vida, nossa amada filha Athena.

A ti, filha amada, também dedico este trabalho. Eu a amo como jamais poderia imaginar que é possível amar. Dez anos se passaram desde meu Mestrado até agora, nesta nova

etapa de minha vida profissional e acadêmica. Vi você se transformar daquela menininha que me chamava para brincar até agora, já crescida, a quem uma vez mais conclamo às grandes realizações que estão à sua frente. Como eu disse há dez anos, que um dia, ao ler este trabalho, que ele sirva para você como inspiração a suas próprias realizações, a seu próprio desafio de avançar rumo ao desconhecido mundo do conhecimento. Lembre-se de que “a verdade está lá fora”, então avance, arrisque-se, erre e acerte em sua jornada e veja em si mesma a pessoa grandiosa, bela e vitoriosa que você é. Em cada um desses momentos de retrocessos e avanços, eu e sua mãe sempre estaremos com você.

À Osvaldo Nogueira Júnior, Coordenador de SMS da aLBriggs Environmental Solutions e Thays Amaro, Coordenadora de Meio Ambiente da ENAUTA que gentilmente apoiaram o presente trabalho com opiniões e sugestões relevantes.

“In memoriam” ao querido Professor Isaac Luquetti, meu Orientador original, que com extrema competência e dedicação entregou sua vida ao ensino e à pesquisa, mas que acima de tudo deixou um legado de simplicidade, respeito e empatia no relacionamento com seus pares. Um exemplo de vida humana e profissional a ser lembrado e honrado.

A meu Orientador, Professor Claudinei, meus mais profundos e sinceros agradecimentos por sua imensa paciência no trato da lentidão com que escrevi este trabalho. Ele soube com maestria me ajudar e incentivar a atravessar meus desafios pessoais e familiares que em muitos momentos pareciam intransponíveis para mim, tamanho era meu cansaço e desolação. Muito obrigado!

A Deus pai, todo poderoso, Alfa e Ômega a quem me submeto à sua vontade, toda a honra e toda a glória.

## RESUMO

SANTOS, MARCELO CRUZ DOS. Modelagem dinâmica da geração de resíduos oleosos resultantes das ações de resposta ao derramamento de óleo na exploração e produção offshore de petróleo e gás natural. Rio de Janeiro, 2024. Tese (Doutorado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

O risco de derramamento de óleo resultante das atividades *offshore* de exploração e produção de petróleo e gás é avaliado por meio de estudos de análise de risco apresentados pelas empresas operadoras ao IBAMA, o órgão responsável pelo licenciamento ambiental federal, os quais determinam a caracterização e quantificação da infraestrutura de apoio necessária ao combate a vazamentos de óleo. A ocorrência de um vazamento implica na aplicação simultânea de diversas metodologias para combater os vazamentos, como contenção e recolhimento, dispersão mecânica e química, e queima local. Cada metodologia gera diferentes volumes e tipologias de resíduos, os quais devem ser na medida do possível adequadamente contabilizados, armazenados e corretamente destinados. O problema central dessa questão é o fato de que em muitos casos, o volume total de resíduos gerados pela aplicação das estratégias de resposta pode ser maior que o próprio volume de óleo vazado, tornando a gestão dos resíduos gerados um desafio tão ou mais complexo do que o próprio combate ao vazamento. A quantificação dos volumes de resíduos gerados pela aplicação das estratégias de resposta é uma tarefa complexa, uma vez que inexiste metodologia que qualifique e quantifique os resíduos resultantes da implementação de cada estratégia de resposta. Os estudos de análise de risco apresentados ao IBAMA limitam-se a modelar a hidrodinâmica e a dispersão do óleo, não apresentando uma correspondente previsão de geração de resíduos, oriunda das estratégias de combate acionadas em caso de vazamento. Diante dessa lacuna, é apresentado um estudo de caso baseado em dados reais de um processo de licenciamento ora em curso no IBAMA, a partir dos quais o sistema de modelagem desenvolvido, baseado na Dinâmica de Sistemas e no software Stella, estimou que para um derramamento de 246.979,87 toneladas de petróleo a aplicação da estratégia de resposta de contenção e recolhimento do óleo em suspensão

geraria um volume de 290.776,29 toneladas de resíduos líquidos e 3,34 toneladas de resíduos sólidos, totalizando 290.779,63 toneladas de resíduos, 17,73% maior do que a massa de óleo derramada. Tais resultados, obtidos por meio do modelo de estimativa de geração de resíduos objeto desta Tese, agregados aos resultados da modelagem hidrodinâmica e de dispersão do óleo, permitem um melhor planejamento e execução do sistema de resposta bem como uma visão antecipada das reais necessidades do sistema de gestão de resíduos no que se refere a seu acolhimento, acondicionamento e destinação final.

**PALAVRAS-CHAVE:** Dinâmica de sistemas, Stella, resíduos oleosos, vazamentos de óleo, petróleo e gás natural, gestão de resíduos.

## **ABSTRACT**

SANTOS, MARCELO CRUZ DOS. Dynamic modeling of oily waste generation resulting from response actions to oil spills in offshore oil and natural gas exploration and production. Rio de Janeiro, 2024. Thesis (Doctorate) – Environmental Engineering Program, Polytechnic School and School of Chemistry, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

The risk of oil spills resulting from offshore oil and gas exploration and production activities is assessed through risk analysis studies presented by operating companies to IBAMA, the agency responsible for federal environmental licensing. These studies determine the characterization and quantification of the support infrastructure needed to combat oil spills. The occurrence of a spill requires the simultaneous application of various methodologies to combat the spills, such as containment and recovery, mechanical and chemical dispersion, and in-situ burning. Each methodology generates different volumes and types of waste, which must be adequately quantified, stored, and properly disposed of wherever possible. The central problem in this context is that, in many cases, the total volume of waste generated by applying response strategies can exceed the volume of spilled oil itself, making the management of generated waste as complex or even more challenging than the spill response itself. Quantifying the volumes of waste generated by response strategies is a complex task since there is no methodology to qualify and quantify the waste resulting from implementing each response strategy. Risk analysis studies presented to IBAMA are limited to modeling the hydrodynamics and dispersion of oil, lacking a corresponding forecast of waste generation from activated response strategies in case of a spill. To address this gap, a case study is presented based on real data from an ongoing licensing process at IBAMA. Using these data, the developed modeling system, based on System Dynamics and the Stella software, estimated that for a spill of 246,979.87 tons of oil, the application of the response strategy for containment and recovery of suspended oil would generate a volume of 290,776.29 tons of liquid waste and 3.34 tons of solid waste, totaling 290,779.63 tons of waste, 17.73% greater than the spilled oil mass. The results obtained through the waste generation estimation model, which is the subject of this Thesis,

combined with the results of hydrodynamic and oil dispersion modeling, enable better planning and execution of the response system, as well as a foresight into the actual needs of the waste management system regarding its reception, storage, and final disposal.

**KEYWORDS:** System dynamics, Stella, oily waste, oil spills, oil and natural gas, waste management.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Barreiras de contenção.....	40
Figura 2: Material absorvente.....	40
Figura 3: <i>Skimmer</i> .....	40
Figura 4: <i>Current buster</i> .....	40
Figura 5: Resultados das ações de resposta e óleo residual.....	47
Figura 6: Sistema "fechado" na ótica da Dinâmica de Sistemas.....	89
Figura 7: Sistema "aberto" na ótica da Dinâmica de Sistemas.....	90
Figura 8: Exemplo de Diagrama de Enlace Causal (CLD) .....	92
Figura 9: Blocos de construção na modelagem "hard".....	96
Figura 10: Concepção geral do modelo.....	107
Figura 11: O mesmo modelo, apresentando as conexões entre os submodelos.....	108
Figura 12: Ligação entre os elementos, sem (esquerda) e com (direita) conector.....	108
Figura 13: Massa total de resíduos oleosos em toneladas (MTRET).....	109
Figura 14: Submodelo de estimativa da massa total de óleo recuperado em toneladas (MTORT).....	111
Figura 15: Conversão do volume do óleo em m <sup>3</sup> para massa em toneladas.....	112
Figura 16: Massa de óleo removida diariamente (MORDT), massa remanescente de óleo diária (MRDOT) e tempo para finalizar a remoção do óleo (TPFRO). .....	114
Figura 17: Fluxo diário de óleo recuperado por absorventes (FDORA). .....	116
Figura 18: Fluxo diário de óleo recuperado por recolhedores (FDORR) .....	119
Figura 19: Massa total de óleo recuperado em toneladas (MTORT). .....	122
Figura 20: Submodelo de estimativa da massa total de resíduos sólidos oleosos em toneladas (MTRST).....	124
Figura 21: Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas (FDRSA). .....	125
Figura 22: Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas (FDRSE).....	129
Figura 23: Massa total de resíduos sólidos oleosos em toneladas (MTRST).....	134
Figura 24: Submodelo de estimativa da massa total de água oleosa em toneladas (MTAOT). .....	137

Figura 25: Fluxo diário de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas (FDAOR). .....	138
Figura 26: Fluxo diário de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas (FDAOD). .....	142
Figura 27: Massa total de água oleosa em toneladas. ....	149
Figura 28: Massa total de resíduos oleosos em toneladas (MTRET). .....	151
Figura 29: Resumo do modelo. .....	152
Figura 30: Painel de Controle do modelo. ....	157
Figura 31: Controles deslizantes. .....	158
Figura 32: Controles da modelagem. ....	158
Figura 33: Botões de informações complementares. ....	158
Figura 34: Janela aberta pelo botão "Acrônimos". ....	159
Figura 35: Janela aberta pelo botão "Estoques". ....	159
Figura 36: Janela aberta pelo botão "Acrônimos - Tabela 1, P1 e P5. ....	160
Figura 37: Janela aberta pelo botão "Ajustes padrão". .....	160
Figura 38: Janela aberta pelo botão "Fluxos". .....	161
Figura 39: Tabela gerada pelo software Stella. ....	161
Figura 40: Gráfico gerado pelo software Stella. ....	162
Figura 41: Janela de inserção de dados da variável OLSM3. .....	164
Figura 42: Janela de inserção de dados da variável DOTM3. ....	166
Figura 43: Resultados do submodelo de óleo recuperado - Tabela. .....	169
Figura 44: Resultados do submodelo de óleo recuperado - Gráfico. .....	169
Figura 45: Resultados do submodelo de resíduos sólidos oleosa - Tabela. ....	171
Figura 46: Resultados do submodelo de resíduos sólidos oleosos - Gráfico. ....	171
Figura 47: Resultados do submodelo de água oleosa - Tabela. ....	173
Figura 48: Resultados do submodelo de água oleosa - Gráfico. ....	173
Figura 49: Massas de resíduos calculadas pelos submodelos e massa total de resíduos oleosos – Tabela. ....	175
Figura 50: Massas de resíduos calculadas pelos submodelos e massa total de resíduos oleosos – Gráfico. ....	175
Figura 51: Volume de óleo em superfície ao longo do período da simulação e respectivos percentuais em relação ao volume do vazamento. ....	177

Figura 52: Massa total do vazamento, massas de resíduos líquidos e sólidos e massa total de resíduos gerados calculadas pelo modelo – Tabela. .... 178

Figura 53: Massa total do vazamento, massas de resíduos líquidos e sólidos e massa total de resíduos gerados calculados pelo modelo – Gráfico..... 179

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Procedimentos e tecnologias de resposta a vazamentos de petróleo no mar. ....	37
Tabela 2: Massas de resíduos gerados por acidentes de vazamento de petróleo .....	42
Tabela 3: Síntese dos compartimentos ambientais do óleo de acordo com balanços de massa e respectivos processos físico-químicos e biológicos responsáveis pelo intemperismo. ....	65
Tabela 4: Percentual e volume de óleo (m <sup>3</sup> ) em superfície ao longo dos 31 dias de simulação em relação ao volume total vazado .....	76
Tabela 5: Características do óleo utilizado nas simulações .....	77
Tabela 6: Embarcações de apoio atuantes nas atividades do Sistema de Produção Antecipada do campo de Atlanta .....	78
Tabela 7: Embarcações de atendimento a emergências de vazamentos de óleo no mar e respectivos parâmetros utilizados no modelo. ....	79
Tabela 8: Recursos disponíveis para ações de contenção e recolhimento de óleo no mar no Sistema Definitivo (SD) do campo de Atlanta .....	80
Tabela 9: Capacidade de recolhimento de óleo de skimmers e current busters .....	81
Tabela 10: Tipologias de resíduos oleosos. ....	101
Tabela 11: Equações e valores referentes à conversão do volume de óleo em m <sup>3</sup> (OLSM3) para massa em toneladas (OLSTN). ....	113
Tabela 12: Equações referentes à massa de óleo removida diariamente (MORDT), massa de óleo remanescente diária (MRDOT) e tempo para finalizar o recolhimento do óleo (TPFRO). ....	115
Tabela 13: Equações e valores referentes ao óleo diário recuperado por absorventes em toneladas (FDORA). ....	117
Tabela 14: Equações e valores referentes ao óleo diário recuperado por recolhedores em toneladas (FDORR). ....	120
Tabela 15: Equações e valores referentes à massa total de óleo recuperado em toneladas (MTORT). ....	123
Tabela 16: Equações e valores referentes aos resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas (FDRSA). ....	126

Tabela 17: Equações e valores referentes aos resíduos sólidos oleosos de EPI's em toneladas (FDRSE).....	131
Tabela 18: Equações e valores referentes à massa total de resíduos sólidos oleosos em toneladas (MTRST).....	135
Tabela 19: Equações e valores referentes à água oleosa gerada por recolhedores em toneladas (FDAOR). ....	139
Tabela 20: Equações e valores referentes à água oleosa gerada por descontaminação em toneladas (FDAOD). ....	145
Tabela 21: Equações e valores referentes à massa total de água oleosa em toneladas (MTAOT). ....	150
Tabela 22: Equações e valores referentes à totalização da massa de resíduos e efluentes oleosos.....	153
Tabela 23: Variáveis utilizadas no modelo de geração de resíduos oleosos. ....	166

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Cálculo da densidade do óleo, a partir de seu grau API.....	77
Equação 2: Óleo superficial em toneladas.....	112
Equação 3: Óleo superficial em m <sup>3</sup> .....	112
Equação 4: Densidade do óleo em toneladas por m <sup>3</sup> .....	110, 117, 123, 127
Equação 5: Tempo para finalizar remoção do óleo.....	114
Equação 6: Massa de óleo removido diariamente em toneladas.....	115
Equação 7: Massa remanescente de óleo diária em toneladas.....	115
Equação 8: Fluxo diário de óleo recuperado por absorventes em toneladas.....	116
Equação 9: Óleo recuperado por mantas absorventes em toneladas.....	116
Equação 10: Óleo recuperado por barreiras absorventes em toneladas. ....	117
Equação 11: Massa total de óleo recuperado por absorventes em toneladas.....	115, 120
Equação 12: Fluxo diário de óleo recuperado por recolhedores em toneladas.....	119
Equação 13: Óleo recuperado por skimmers em toneladas.....	119
Equação 14: Óleo recuperado por current busters em toneladas.....	120
Equação 15: Massa total de óleo recuperado por recolhedores em toneladas...	118, 120
Equação 16: Massa total de óleo recuperado em toneladas.....	120, 150
Equação 17: Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas.	125
Equação 18: Resíduos sólidos oleosos de mantas absorventes.....	126
Equação 19: Resíduos sólidos oleosos de barreiras absorventes.....	126
Equação 20: Massa total de resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas. ....	124, 126
Equação 21: Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas.....	129
Equação 22: Resíduos sólidos oleosos de botas.....	130
Equação 23: Quantidade de pares de botas.....	130
Equação 24: Resíduos sólidos oleosos de luvas.....	130
Equação 25: Quantidade de pares de luvas.....	130
Equação 26: Resíduos sólidos oleosos de macacões.....	131
Equação 27: Quantidade de macacões.....	131
Equação 28: Massa total de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas.....	129, 133
Equação 29: Massa total de resíduos sólidos oleosos em toneladas.. ....	132,151

Equação 30: Fluxo diário de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas.....	138
Equação 31: Água oleosa gerada por skimmers.....	138
Equação 32: Água oleosa gerada por Current Busters.....	138
Equação 33: Massa total de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas.	137, 148
Equação 34: Fluxo diário de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas. .....	142
Equação 35: Água oleosa da lavagem de embarcações.....	142
Equação 36: Descontamina 1x durante duração da modelagem. ....	143
Equação 37: Água oleosa da lavagem de EPI. ....	143
Equação 38: Água oleosa da lavagem de botas.....	143
Equação 39: Água oleosa da lavagem de luvas.....	143
Equação 40: Água oleosa da lavagem de macacões.....	144
Equação 41: Descontamina na frequência de troca dos EPIs.....	144
Equação 42: Água oleosa da lavagem de skimmers.....	144
Equação 43: Água oleosa da lavagem de current busters.....	144
Equação 44: Água oleosa da lavagem de barreiras oceânicas.....	145
Equação 45: Água oleosa da lavagem de tanques das embarcações. ....	145
Equação 46: Água oleosa da lavagem de tanques temporários.....	145
Equação 47: Massa total de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas. .....	143, 147
Equação 48: Massa total de água oleosa em toneladas.....	147, 151
Equação 49: Massa total de resíduos oleosos em toneladas.....	152

## LISTA DE ACRÔNIMOS - EQUAÇÕES

<b>AOBOC</b>	Água oleosa da lavagem de barreiras oceânicas
<b>AOBOT</b>	Água oleosa da lavagem de botas
<b>AOEMB</b>	Água oleosa da lavagem de embarcações
<b>AOEPI</b>	Água oleosa da lavagem de EPI
<b>AOGCB</b>	Água oleosa gerada por <i>Current Busters</i>
<b>AOGSK</b>	Água oleosa gerada por <i>Skimmers</i>
<b>AOLCB</b>	Água oleosa da lavagem de <i>Current Busters</i>
<b>AOLSK</b>	Água oleosa da lavagem de <i>Skimmers</i>
<b>AOLUV</b>	Água oleosa da lavagem de luvas
<b>AOMAC</b>	Água oleosa da lavagem de macacões
<b>AOTQE</b>	Água oleosa da lavagem de tanques das embarcações
<b>AOTQT</b>	Água oleosa da lavagem de tanques temporários
<b>DCTDM</b>	Descontamina 1x durante duração da modelagem
<b>DCTTE</b>	Descontamina na frequência de troca dos EPIs
<b>DOTM3</b>	Densidade do óleo em toneladas por m <sup>3</sup>
<b>FDAOD</b>	Fluxo diário de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas
<b>FDAOR</b>	Fluxo diário de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas
<b>FDORA</b>	Fluxo diário de óleo recuperado por absorventes em toneladas
<b>FDORR</b>	Fluxo diário de óleo recuperado por recolhedores em toneladas
<b>FDRSA</b>	Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas
<b>FDRSE</b>	Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas
<b>MORDT</b>	Massa de óleo removido diariamente em toneladas
<b>MRDOT</b>	Massa remanescente de óleo diária em toneladas
<b>MTAOT</b>	Massa total de água oleosa em toneladas
<b>MTORT</b>	Massa total de óleo recuperado em toneladas
<b>MTRET</b>	Massa total de resíduos oleosos em toneladas
<b>MTRST</b>	Massa total de resíduos sólidos oleosos em toneladas
<b>OLSTN</b>	Óleo superficial em toneladas
<b>ORBAB</b>	Óleo recuperado por barreiras absorventes em toneladas

<b>ORCBT</b>	Óleo recuperado por current busters em toneladas
<b>ORMAB</b>	Óleo recuperado por mantas absorventes em toneladas
<b>ORSKT</b>	Óleo recuperado por skimmers em toneladas
<b>ROBAB</b>	Resíduos sólidos oleosos de barreiras absorventes
<b>ROBOT</b>	Resíduos sólidos oleosos de botas
<b>ROLUV</b>	Resíduos sólidos oleosos de luvas
<b>ROMAB</b>	Resíduos sólidos oleosos de mantas absorventes
<b>ROMAC</b>	Resíduos sólidos oleosos de macacões
<b>TPFRO</b>	Tempo para finalizar remoção do óleo

## LISTA DE ACRÔNIMOS - VALORES VARIÁVEIS

<b>CABAB</b>	Capacidade de absorção de cada barreira por m
<b>CAMAB</b>	Capacidade de absorção de cada manta
<b>CBABS</b>	Comprimento de barreiras absorventes em m
<b>CBOCE</b>	Comprimento das barreiras oceânicas em m
<b>CCEMB</b>	Comprimento do costado das embarcações
<b>CNCBT</b>	Capacidade nominal dos Current Busters
<b>CNSKI</b>	Capacidade nominal dos skimmers
<b>DAOTM</b>	Densidade da água oleosa em toneçadas por m <sup>3</sup>
<b>DUMOD</b>	Duração da modelagem
<b>FCKGT</b>	Fator de conversão de kg para toneladas
<b>FRQTR</b>	Frequência de troca dos EPIs
<b>GRAPI</b>	Grau API do óleo vazado
<b>OLSM3</b>	Óleo superficial em m <sup>3</sup>
<b>PBABS</b>	Peso de cada m de barreira absorvente em kg por m
<b>PBOTA</b>	Peso de cada par de botas em kg por unidade
<b>PLUVA</b>	Peso de cada par de luvas em kg por unidade
<b>PMABS</b>	Peso de cada manta absorvente em kg por unidade
<b>PMACC</b>	Peso de cada macacão em kg por unidade
<b>QBOTA</b>	Quantidade de pares de botas
<b>QLUVA</b>	Quantidade de pares de luvas
<b>QMABS</b>	Quantidade de mantas absorventes
<b>QMACC</b>	Quantidade de macacões
<b>QTCBT</b>	Quantidade de Current Busters
<b>QTSKI</b>	Quantidade de skimmers
<b>RAUBA</b>	Razão água utilizada por m de barreira oceânica
<b>RAUBO</b>	Razão água utilizada por bota
<b>RAUCB</b>	Razão água utilizada por Current Buster
<b>RAUCE</b>	Razão água utilizada por m de costado das embarcações
<b>RAULV</b>	Razão água utilizada por luva

<b>RAUMC</b>	Razão água utilizada por macacão
<b>RAUSK</b>	Razão água utilizada por skimmer
<b>RAUTE</b>	Razão água utilizada por m <sup>3</sup> dos tanques embarcações
<b>RAUTT</b>	Razão água utilizada por m <sup>3</sup> dos tanques temporários
<b>TECBT</b>	Taxa de eficiência dos Current Busters
<b>TEQLP</b>	Tamanho da equipe de limpeza
<b>TESKI</b>	Taxa de eficiência dos skimmers
<b>TUCBT</b>	Tempo diário de utilização dos Current Busters
<b>TUSKI</b>	Tempo diário de utilização dos skimmers
<b>VOBAB</b>	Volume de óleo agregado a cada m de barreira absorvente em m <sup>3</sup> por m
<b>VOBOT</b>	Volume de óleo agregado a cada bota em m <sup>3</sup> por unidade
<b>VOLUV</b>	Volume de óleo agregado a cada luva em m <sup>3</sup> por unidade
<b>VOMAB</b>	Volume de óleo agregado a cada manta absorvente em m <sup>3</sup> por unidade
<b>VOMAC</b>	Volume de óleo agregado a cada macacão em m <sup>3</sup> por unidade
<b>VTQEM</b>	Volume total dos tanques das embarcações
<b>VTQTP</b>	Volume total dos tanques temporários

## **LISTA DE ACRÔNIMOS - VALORES FIXOS**

<b>MRSAB</b>	Massa total resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas
<b>MRSEP</b>	Massa total de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas
<b>MTADT</b>	Massa total de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas
<b>MTART</b>	Massa total de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas
<b>MTRAT</b>	Massa total de óleo recuperado por absorventes em toneladas
<b>MTRRT</b>	Massa total óleo recuperado por recolhedores em toneladas

## SUMÁRIO

DEDICATÓRIA .....	5
AGRADECIMENTOS .....	7
RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	11
CAPÍTULO 1 .....	32
1 INTRODUÇÃO.....	33
CAPÍTULO 2 .....	36
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	37
2.1 GERAÇÃO DE RESÍDUOS OLEOSOS E ESTRATÉGIAS DE REMOÇÃO.....	37
2.2 O AFUNDAMENTO DA PLATAFORMA DEEPWATER HORIZON EM 2010 .....	45
2.3 O VAZAMENTO DO PETROLEIRO ATHOS 1 EM 2004 .....	48
2.4 O AFUNDAMENTO DO PETROLEIRO VOLGONEFT 139 EM 2007 .....	49
2.5 CONCLUSÕES A PARTIR DOS ACIDENTES COM A PLATAFORMA DEEPWATER HORIZON E COM OS PETROLEIROS ATHOS 1 E VOLGONEFT-139 .....	50
2.5.1 O PETROLEIRO ATHOS 1 .....	51
2.5.2 A PLATAFORMA DEEPWATER HORIZON (DWH).....	51
2.5.3 O PETROLEIRO VOLGONEFT-139 .....	52
2.5.4 CONCLUSÕES .....	54
2.6 INTEMPERISMO E PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO ÓLEO EM AMBIENTE MARINHO.....	60
2.6.1 ESPALHAMENTO .....	61
2.6.2 EVAPORAÇÃO .....	61
2.6.3 EMULSIFICAÇÃO .....	61
2.6.4 DISSOLUÇÃO .....	62
2.6.5 FOTO-OXIDAÇÃO .....	62
2.6.6 BIODEGRADAÇÃO .....	63
2.6.7 SEDIMENTAÇÃO.....	63
2.6.8 DISPERSÃO .....	64

2.6.9	EMERSÃO DO ÓLEO .....	64
2.6.10	MISTURA TURBULENTA .....	64
2.6.11	TRANSPORTE.....	65
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>		<b>68</b>
3	OBJETIVOS E RELEVÂNCIA.....	69
3.1	OBJETIVOS.....	70
3.2	RELEVÂNCIA .....	71
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>		<b>74</b>
4	METODOLOGIA .....	75
4.1	BASE DE DADOS PARA A MODELAGEM DOS VOLUMES DE RESÍDUOS OLEOSOS 75	
4.2	ESTRUTURA ORGANIZACIONAL DE RESPOSTA (EOR) .....	77
4.2.1	EMBARCAÇÕES DE APOIO E RESPOSTA.....	78
4.2.2	EQUIPAMENTOS DE RESPOSTA .....	79
4.2.2.1	DIMENSIONAMENTO DA CAPACIDADE DE RESPOSTA .....	79
4.3	DINÂMICA DE SISTEMAS .....	81
4.3.1	SISTEMAS E MODELOS.....	81
4.3.1.1	SISTEMAS COMPLEXOS .....	85
4.3.2	FUNDAMENTOS DA DINÂMICA DE SISTEMAS.....	87
4.3.2.1	SISTEMAS ABERTOS E FECHADOS .....	88
4.3.3	TIPOS DE MODELAGEM EM DINÂMICA DE SISTEMAS .....	90
4.3.3.1	MODELAGEM “SOFT” .....	91
4.3.3.2	MODELAGEM “HARD” .....	92
4.3.4	A LINGUAGEM DE ESTOQUES E FLUXOS .....	92
4.3.4.1	ESTOQUES .....	93
4.3.4.2	FLUXOS.....	93
4.3.4.3	ELEMENTOS AUXILIARES.....	94
4.3.4.4	CONVERSORES .....	94
4.3.4.5	CONECTORES .....	94
4.3.4.6	“FANTASMAS” .....	95

4.3.4.7	“DELAYS” .....	95
4.4	FERRAMENTA COMPUTACIONAL UTILIZADA.....	96
4.4.1	O SOFTWARE STELLA .....	97
4.4.2	POR QUÊ STELLA, E NÃO ITHINK?.....	98
4.5	DESENVOLVIMENTO DO MODELO .....	100
4.5.1	TIPOS DE RESÍDUOS OLEOSOS GERADOS.....	101
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>.....</b>	<b>103</b>
5	CONCEPÇÃO GERAL DO MODELO DE ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS..	104
5.1	EQUAÇÕES REFERENTES AO SUBMODELO DE ÓLEO RECUPERADO.....	110
5.1.1	CONVERSÃO DO VOLUME DE ÓLEO EM M <sup>3</sup> (OLSM3) PARA MASSA EM TONELADAS (OLSTN).....	111
5.1.1.1	OLSTN: Óleo superficial em toneladas. ....	112
5.1.1.1.1	OLSM3: Óleo superficial em m <sup>3</sup> . ....	112
5.1.1.1.2	DOTM3: Densidade do óleo em toneladas por m <sup>3</sup> . ....	112
5.1.2	MASSA DE ÓLEO REMOVIDA DIARIAMENTE (MORDT), MASSA DE ÓLEO REMANESCENTE DIÁRIA (MRDOT) E TEMPO PARA FINALIZAR A REMOÇÃO DO ÓLEO (TPFRO) .....	113
5.1.2.1	TPFRO: Tempo para finalizar remoção do óleo.....	114
5.1.2.1.1	MORDT: Massa de óleo removido diariamente em toneladas.....	115
5.1.2.1.2	MRDOT: Massa remanescente de óleo diária em toneladas.....	115
5.1.3	ÓLEO DIÁRIO RECUPERADO POR ABSORVENTES (FDORA) .....	116
5.1.3.1	FDORA: Fluxo diário de óleo recuperado por absorventes em toneladas.	116
5.1.3.1.1	ORMAB: Óleo recuperado por mantas absorventes em toneladas.	116
5.1.3.1.2	ORBAB: Óleo recuperado por barreiras absorventes em toneladas.	117
5.1.3.2	MTRAT: Massa total de óleo recuperado por absorventes em toneladas.	117
5.1.4	ÓLEO DIÁRIO RECUPERADO POR RECOLHEDORES (FDORR) .....	118
5.1.4.1	FDORR: Fluxo diário de óleo recuperado por recolhedores em toneladas.	119

5.1.4.1.1	DOTM3: Densidade do óleo em toneladas por m <sup>3</sup> .	119
5.1.4.1.2	ORSKT: Óleo recuperado por skimmers em toneladas.	119
5.1.4.1.3	ORCBT: Óleo recuperado por current busters em toneladas.	120
5.1.4.2	MTRRT: Massa total de óleo recuperado por recolhedores em toneladas.	120
5.1.5	MASSA TOTAL DE ÓLEO RECUPERADO EM TONELADAS (MTORT)	121
5.1.5.1	MTORT: Massa total de óleo recuperado em toneladas.	122
5.1.5.1.1	MTRAT: Massa total de óleo recuperado por absorventes em toneladas.	122
5.1.5.1.2	MTRRT: Massa total de óleo recuperado por recolhedores em toneladas.	123
5.2	EQUAÇÕES REFERENTES AO SUBMODELO DE RESÍDUOS SÓLIDOS OLEOSOS	<b>123</b>
5.2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS OLEOSOS DIÁRIOS GERADOS POR ABSORVENTES (FDRSA)	124
5.2.1.1	FDRSA: Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas.	125
5.2.1.1.1	DOTM3: Densidade do óleo em toneladas por m <sup>3</sup> .	125
5.2.1.1.2	ROMAB: Resíduos sólidos oleosos de mantas absorventes.	126
5.2.1.1.3	ROBAB: Resíduos sólidos oleosos de barreiras absorventes.	126
5.2.1.2	MRSAB: Massa total de resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas.	126
5.2.2	RESÍDUOS SÓLIDOS OLEOSOS DIÁRIOS GERADOS POR EPI (FDRSE)	128
5.2.2.1	FDRSE: Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas.	129
5.2.2.1.1	DOTM3: Densidade do óleo em toneladas por m <sup>3</sup> .	129
5.2.2.1.2	ROBOT: Resíduos sólidos oleosos de botas.	130
5.2.2.1.2.1	QBOTA: Quantidade de pares de botas.	130
5.2.2.1.3	ROLUV: Resíduos sólidos oleosos de luvas.	130
5.2.2.1.3.1	QLUVA: Quantidade de pares de luvas.	130
5.2.2.1.4	ROMAC: Resíduos sólidos oleosos de macacões.	131
5.2.2.1.4.1	QMACC: Quantidade de macacões.	131
5.2.2.2	MRSEP: Massa total de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas.	131

5.2.3	MASSA TOTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS OLEOSOS EM TONELADAS (MTRST) ..	133
5.2.3.1	MTRST: Massa total de resíduos sólidos oleosos em toneladas. ....	134
5.2.3.1.1	MRSAB: Massa total de resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas. ....	134
5.2.3.1.2	MRSEP: Massa total de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas. ....	135
5.3	EQUAÇÕES REFERENTES AO SUBMODELO DE ÁGUA OLEOSA .....	136
5.3.1	ÁGUA OLEOSA DIÁRIA GERADA POR RECOLHEDORES (FDAOR).....	137
5.3.1.1	FDAOR: Fluxo diário de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas.....	138
5.3.1.1.1	AOGSK: Água oleosa gerada por skimmers.....	138
5.3.1.1.2	AOGCB: Água oleosa gerada por Current Busters. ....	138
5.3.1.2	MTART: Massa total de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas.....	139
5.3.2	ÁGUA OLEOSA DIÁRIA GERADA POR DESCONTAMINAÇÃO (FDAOD) .....	140
5.3.2.1	FDAOD: Fluxo diário de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas.....	142
5.3.2.1.1	AOEMB: Água oleosa da lavagem de embarcações.....	142
5.3.2.1.1.1	DCTDM: Descontamina 1x durante duração da modelagem. ....	143
5.3.2.1.2	AOEPI: Água oleosa da lavagem de EPI.....	143
5.3.2.1.2.1	AOBOT: Água oleosa da lavagem de botas.....	143
5.3.2.1.2.2	AOLUV: Água oleosa da lavagem de luvas.....	143
5.3.2.1.2.3	AOMAC: Água oleosa da lavagem de macacões. ....	144
5.3.2.1.2.4	DCTTE: Descontamina na frequência de troca dos EPIs. ....	144
5.3.2.1.3	AOLSK: Água oleosa da lavagem de skimmers.....	144
5.3.2.1.4	AOLCB: Água oleosa da lavagem de current busters. ....	144
5.3.2.1.5	AOBOC: Água oleosa da lavagem de barreiras oceânicas. ....	145
5.3.2.1.6	AOTQE: Água oleosa da lavagem de tanques das embarcações. ...	145
5.3.2.1.7	AOTQT: Água oleosa da lavagem de tanques temporários. ....	145
5.3.2.2	MTADT: Massa total de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas.....	145

5.3.3	MASSA TOTAL DE ÁGUA OLEOSA EM TONELADAS (MTAOT) .....	148
5.3.3.1	MTAOT: Massa total de água oleosa em toneladas.....	149
5.3.3.2	MTADT: Massa total de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas.....	149
5.3.3.3	MTART: Massa total de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas.....	150
5.4	EQUAÇÕES REFERENTES À TOTALIZAÇÃO DA MASSA DE RESÍDUOS OLEOSOS ...	<b>150</b>
5.4.1	MTRET: MASSA TOTAL DE RESÍDUOS OLEOSOS EM TONELADAS. ....	152
5.4.1.1	MTORT: Massa total de óleo recuperado em toneladas. ....	152
5.4.1.2	MTRST: Massa total de resíduos sólidos oleosos em toneladas. ....	153
5.4.1.3	MTAOT: Massa total de água oleosa em toneladas.....	153
<b>CAPÍTULO 6</b>	.....	<b>156</b>
6	PLATAFORMA DE MANIPULAÇÃO DO MODELO DE ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS .....	<b>157</b>
<b>CAPÍTULO 7</b>	.....	<b>163</b>
7	APLICAÇÃO PRÁTICA DO MODELO DE ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS – CENÁRIO DE PIOR CASO ENAUTA.....	<b>164</b>
7.1	RESULTADOS REFERENTES AO SUBMODELO DE ÓLEO RECUPERADO .....	168
7.2	RESULTADOS REFERENTES AO SUBMODELO DE RESÍDUOS SÓLIDOS OLEOSOS 170	
7.3	RESULTADOS REFERENTES AO SUBMODELO DE ÁGUA OLEOSA .....	172
7.4	RESULTADOS REFERENTES À MASSA TOTAL DE RESÍDUOS OLEOSOS GERADOS 174	
7.5	SÍNTESE DOS RESULTADOS DA MODELAGEM – CENÁRIO DE PIOR CASO ENAUTA 176	
<b>DISCUSSÃO</b>	.....	<b>180</b>
	DISCUSSÃO .....	181
<b>CONCLUSÃO</b>	.....	<b>189</b>
	CONCLUSÃO .....	190

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>193</b>
REFERÊNCIAS.....	194
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>217</b>
APÊNDICES.....	218

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

**“ Não é porque as coisas são difíceis que deixamos de fazê-las. É porque deixamos de fazê-las que elas se tornam difíceis. ”**

Sêneca - Lucius Aneus Seneca  
☆ 4a.C. / † 65d.C.

## 1 INTRODUÇÃO

Vazamentos de petróleo são eventos intrinsecamente relacionados com a indústria mundial de petróleo e gás natural em suas diversas ramificações. Dados estatísticos da *International Tanker Owners Pollution Federation* (ITOPF) estimam que aproximadamente 5,86 milhões de toneladas de petróleo bruto foram lançadas nos oceanos especificamente como resultado de incidentes causados por petroleiros de 1970 a 2018 (ITOPF, 2019). No que se refere à ocorrência de vazamentos de óleo com origem nas atividades offshore de exploração e produção, dados apresentados por Morgan et al. (2014), destacam que embora menos frequentes, costumam ter impactos mais significativos por conta dos grandes volumes de seus vazamentos, e em especial por sua proximidade com a linha costeira. Como exemplo, citam o Campo de Ekofisk Bravo no Mar do Norte, de onde em 1977 foram derramados mais de 27.000 toneladas de petróleo bruto, a plataforma de Nowruz que em 1983 durante a primeira Guerra do Golfo derramou 260.000 toneladas de petróleo cru no Golfo Pérsico, a erupção do Poço Ixtoc I que liberou mais de 450.000 toneladas de óleo no Golfo do México e novamente no Golfo do México, a explosão da plataforma Deepwater Horizon em 2010 que resultou no lançamento de 627.000 toneladas de petróleo bruto para as águas do Golfo.

Morgan et al. (2014), citam ainda estatísticas que indicam que desde o início do século passado houve um significativo aumento na quantidade e volume dos derramamentos de óleo associados às atividades offshore de exploração, produção e transporte de petróleo. Nos períodos compreendidos entre 1910 e 1960, entre 1962 e 1990, e entre 1991 e 2012, teriam sido lançados anualmente em média respectivamente 114.062, 123.277 e 164.299 toneladas de petróleo bruto nos oceanos ao redor do Globo, o que totaliza cerca de 13 milhões de toneladas, estimativa bastante distinta daquela apresentada por Li et al. (2016), que estimam o lançamento de cerca de 7 milhões de toneladas lançadas ao mar por 140 grandes vazamentos ocorridos entre 1907 e 2014.

Vazamentos de petróleo no mar e as operações de resposta subsequentes geram diferentes tipos de resíduos oleosos em grandes quantidades, cujo gerenciamento é um desafio significativo que as equipes de resposta enfrentam (REMPEC, 2010; Hafezi et al., 2022).

A ocorrência de um evento de vazamento de petróleo no mar dá início ao lançamento de uma complexa operação que objetiva a rápida remoção do ambiente marinho da maior quantidade de óleo que seja possível, por meio de estratégias de resposta que abrangem uma variedade de métodos, como a ação de contenção e recuperação do óleo ainda no mar, o uso de dispersantes químicos, e a queima controlada local, em paralelo à proteção à linha de costa (Chen et al., 2019).

As operações necessárias ao recolhimento de óleo implicam a adoção de forma isolada ou simultânea de diversas estratégias de resposta que objetivam a remoção desses lançamentos de petróleo nos oceanos. Ocorre que em muitas dessas ocasiões as ações de resposta<sup>1</sup> acabam por gerar elevados volumes de resíduos oleosos e contaminados por óleo que podem chegar a volumes muitas vezes superiores ao próprio volume de óleo derramado (IPIECA-IOGP, 2015; POSOW, 2016). Diversos tipos de resíduos oleosos podem ser gerados, dentre os quais óleo, óleo intemperizado, material sólido oleado, sedimentos oleados, equipamentos de recolhimento e EPIs oleados (National Research Council, 2003). A gestão desses resíduos pode ser a fase das ações de resposta de maior complexidade e dificuldade, na medida em que é necessário um planejamento prévio que estabeleça os protocolos necessários ao recolhimento, acumulação, transporte, tratamento e disposição final desses resíduos. Agrava o fato que ao se lidar com tais resíduos, na prática as operações lidam com diversas tipologias diferentes, tais como óleo recuperado, resíduos sólidos oleosos, água oleosa, areia e cascalho contaminados com óleo, etc., cada uma delas com características e necessidades de tratamento e disposição próprias. De acordo com IPIECA-IOGP (2014), os elevados volumes de resíduos podem exceder a capacidade de infraestrutura local para gerenciamento de resíduos, caracterizando-se como o aspecto mais caro e demorado na gestão de um vazamento de petróleo.

O tipo de resíduo oleoso gerado, o tipo de tratamento disponível, as instalações e infraestrutura disponíveis precisam ser levadas em consideração ao considerar a

---

<sup>1</sup> O termo “resposta” refere-se ao conjunto de medidas tomadas para conter, controlar, mitigar e limpar os impactos de um vazamento de petróleo no ambiente, incluindo a proteção de áreas sensíveis, recuperação do óleo derramado e gerenciamento dos resíduos gerados.

gestão de resíduos, o que é uma questão complexa, uma vez que fatores ambientais, econômicos e sociais relevantes são determinantes na estrutura de gestão (Jordão da Silva, 2012).

O correto gerenciamento desses resíduos gerados pela implementação das estratégias de resposta é tido como a etapa mais complexa e custosa de um vazamento de petróleo. Os diferentes tipos e volumes de resíduos gerados afetam diretamente a tomada de decisão no que se refere à definição das opções mais adequadas de tratamento e disposição final, sendo necessário para tal uma previsão o mais próxima possível da realidade dos volumes e tipos de resíduos a serem gerados (IPIECA-IOGP, 2014), o que é uma tarefa de grande dificuldade, na medida em que inexistem ferramentas que permitam essa estimativa e o correspondente preparo prévio e adaptação progressiva da cadeia logística de recepção, tratamento e disposição final dos resíduos proporcional ao volume e tipologia dos resíduos a serem gerados.

O cenário acima relatado, associado à ausência de ferramentas que permitam a geração de prognósticos que indiquem estimativas qualitativas e quantitativas do perfil de resíduos a serem gerados após um evento de derramamento de óleo no mar acaba por caracterizar uma lacuna, um *“gap”* de conhecimento que precisava ser completado. O modelo desenvolvido tem a intenção de eliminar essa lacuna, na medida em que permite não apenas estimar quantitativamente os resíduos oleosos totais gerados por um derramamento de óleo no mar, como também qualificar individualmente os montantes de resíduos oleosos sólidos e líquidos gerados pela aplicação das ações de resposta. Essa nova ferramenta permite ampliar o espectro do prévio planejamento da eventualmente necessária infraestrutura de gestão de resíduos, por meio de uma cadeia logística preparada e bem dimensionada desde o recebimento dos resíduos oleosos, até seu transporte, tratamento e destinação final.

# CAPÍTULO 2

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

**“** Nascestes no lar que precisavas, vestistes o corpo físico que merecias, moras onde melhor Deus te proporcionou, de acordo com teu adiantamento. Possuis os recursos financeiros coerentes com as tuas necessidades, nem mais, nem menos, mas o justo para as tuas lutas terrenas. Teu ambiente de trabalho é o que elegeste espontaneamente para a tua realização. Teus parentes e amigos são as almas que atraíste, com tua própria afinidade. Portanto, teu destino está constantemente sob teu controle. Tu escolhes, recolhes, eleges, atraís, buscas, expulsas, modificas tudo aquilo que te rodeia a existência. Teus pensamentos e vontade são a chave de teus atos e atitudes. São as fontes de atração e repulsão na tua jornada vivência. Não reclames nem te faças de vítima. Antes de tudo, analisa e observa. A mudança está em tuas mãos. Reprograma tua meta, busca o bem e viverás melhor. Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim. **”**

Chico Xavier – Médiun Brasileiro

☆ 1910 / † 2002

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 GERAÇÃO DE RESÍDUOS OLEOSOS E ESTRATÉGIAS DE REMOÇÃO

Os eventos de vazamentos de petróleo no mar são objeto da aplicação de diversas tecnologias que tem como objetivo a rápida remoção e minimização do óleo vazado para o ambiente marinho (Chen et al., 2019). As tecnologias de resposta, também chamadas de procedimentos de resposta, são divididas em procedimentos de natureza mecânica, que envolvem a contenção e o recolhimento com o uso de barreiras de contenção e equipamentos recolhedores de óleo como *skimmers* e *current busters*, por material de natureza absorvente como mantas e barreiras absorventes, e por último por procedimentos de natureza química que faz uso de dispersantes químicos ou da queima local controlada do óleo flutuante (Dave e Ghaly, 2011; Ivshina et al., 2015; Li et al., 2016; Chen et al., 2019), conforme resumido na Tabela 1.

Tabela 1: Procedimentos e tecnologias de resposta a vazamentos de petróleo no mar.

TIPO DE PROCEDIMENTO	TECNOLOGIA DE RESPOSTA
<b>Mecânico</b>	Skimmers
	Current Busters
	Barreiras oceânicas
	Mantas absorventes
	Barreiras absorventes
<b>Químico</b>	Dispersantes químicos
	Queima local controlada

Os principais benefícios e desvantagens desses procedimentos são descritos em IPIECA-IOGP (2019), como segue:

- Contenção e recolhimento:
  - ✓ Benefícios: Remoção do óleo com mínimo impacto ambiental, grande “janela de oportunidade<sup>2</sup>”, maior disponibilidade de equipamentos e expertise, possibilidade de reaproveitamento do óleo recuperado;
  - ✓ Desvantagens: Baixa eficiência de recuperação em grandes vazamentos, procedimento lento, ineficiente e impraticável em óleos já dispersos,

<sup>2</sup> “Janela de oportunidade” é um intervalo de tempo desde o lançamento do óleo no ambiente até o início das ações de resposta, cuja eficácia varia na razão inversa do tempo transcorrido. Ou seja, quanto mais rápida for a aplicação da ação de resposta escolhida, melhor será seu efeito sobre a remoção do óleo do ambiente.

eficácia reduzida em condições climáticas adversas ou mares agitados, alta proporção de recuperação de água, requer capacidade de armazenamento e posterior tratamento/disposição para o material recuperado.

- Queima local controlada:
  - ✓ Benefícios: Rápida remoção de grandes volumes de óleo, menos óleo restante para descarte, menos equipamentos e mão de obra necessários, nenhuma exigência de armazenamento para óleo recuperado (exceto para os resíduos de queima), eficaz em uma ampla gama de tipos de óleo, menos vapores de óleo na superfície da água, o que melhora a segurança dos socorristas;
  - ✓ Desvantagens: Emissão de gases de efeito estufa, fumaça preta percebida como um impacto negativo nas pessoas e na atmosfera, “janela de oportunidade” limitada para derramamentos em águas abertas, necessidade de contenção de grandes volumes de óleo para aumentar a espessura da película para que a queima seja eficaz, baixa eficiência para óleos mais pesados e emulsionados, potencial risco para a vida marinha, resíduos da queima podem afundar logo após a queima, redução localizada da qualidade do ar, ineficaz em condições climáticas adversas ou mares agitados.
- Dispersantes químicos:
  - ✓ Benefícios: Menos mão de obra e exigências logísticas do que outras opções de resposta, pode ser aplicado em diversas condições climáticas, remove mais óleo do que outras opções de resposta, acelera a remoção de óleo da coluna de água, melhorando a biodegradação natural, remove ou reduz as películas de óleo na superfície, reduz a quantidade de óleo que se espalha pela linha costeira, nenhuma exigência de armazenamento ou disposição de óleo recuperado, redução dos vapores na superfície da água;
  - ✓ Desvantagens: Pode ter uma “janela de oportunidade” limitada para uso à medida que o óleo se degrada, não remove o óleo do ambiente, apenas o dispersa na coluna de água, possíveis efeitos negativos do óleo

disperso, potencial impacto econômico nas indústrias de pesca com base na confiança do mercado por conta da percepção do público consumidor sobre os possíveis efeitos negativos do dispersante sobre os frutos do mar..

A gestão dos resíduos oriundos de um vazamento implica na necessidade de estabelecer uma cadeia logística que permita a satisfatória transferência dos resíduos gerados desde seu local de geração até um local adequado para seu recolhimento, acumulação, transporte, tratamento e disposição final. Essa infraestrutura deve estar disponível tão logo as ações de combate ao vazamento e conseqüentemente a geração de resíduos tenham início, em função da interdependência entre as ações de limpeza e recebimento dos resíduos, de forma que não seja criado um fator limitante à capacidade de acolhimento dos resíduos, o que pode implicar em contaminações secundárias, riscos adicionais e elevação dos custos da operação. Na ocorrência de um vazamento de petróleo, o principal e imediato objetivo das ações de resposta adotadas é a máxima redução dos danos socioambientais que podem ser causados pela ação tóxica do óleo derramado. (IPIECA-IOGP, 2014).

As operações de combate ao vazamento têm a tendência de fazer uso imediato de todas as opções de resposta disponíveis, salvo a ocorrência de restrições legais, logísticas e meteoceanográficas que impeçam ou minimizem a eficácia do uso de dispersantes ou da queima local. Por outro lado, aqueles já citados procedimentos de natureza mecânica, que envolvem a contenção e o recolhimento com o uso de barreiras de contenção (Figura 1), material de natureza absorvente (Figura 2), *skimmers* (Figura 3), e *current busters* (Figura 4), tem seu uso largamente adotado sendo em muitas vezes considerados como a principal ação de resposta, apesar de seus diversos fatores limitantes (IPIECA-IOGP, 2015; IPIECA-IOGP, 2019).



Figura 1: Barreiras de contenção.



Figura 2: Material absorvente.



Figura 3: Skimmer.

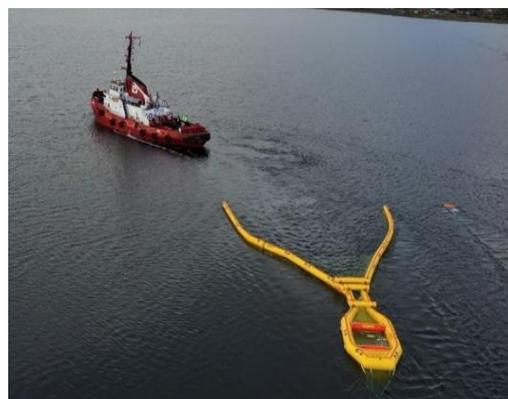


Figura 4: Current buster.

O termo *skimmer* é utilizado para definir qualquer dispositivo de natureza mecânica utilizado na remoção do óleo da água sem alterar suas características químicas ou físicas. Nesse aspecto, *current busters* podem eventualmente ser assemelhados a *skimmers*, inclusive no que se refere ao desempenho de ambos os tipos de equipamentos, que são medidos pela taxa de recuperação de óleo e água oleosa. Tais equipamentos podem também ser chamados genericamente de “recolhedores”. O desempenho desses equipamentos é diretamente dependente de diversos fatores, como tipo de óleo, grau de intemperização, espessura da mancha, presença de detritos flutuantes e condições ambientais que incluem direção do vento e das correntes, altura das ondas e temperatura do ar e da água. O principal benefício da utilização da técnica de contenção e recolhimento é a efetiva remoção de óleo da água, ainda que a eficiência do recolhimento seja normalmente limitada a algo em torno de 5% a 20% do volume total de óleo derramado (IPIECA-IOGP 2015). Apesar dessa baixa eficiência de recolhimento e da alta taxa de geração de resíduos que incluem o próprio óleo

recuperado, água oleosa e resíduos sólidos oleosos em especial de EPI's (Saleem et al., 2022) um dos principais benefícios da contenção e recolhimento é a tentativa de minimizar a chegada do óleo na costa, onde a geração de resíduos oleosos pode atingir de 30 a 40 vezes o volume do óleo derramado.

De fato, dados históricos indicam que derramamentos de petróleo no mar podem gerar quantidades de resíduos muito superiores ao próprio volume de óleo derramado (Hupponen et al., 2007). De acordo com Wadsworth (2014), o volume de óleo derramado não é o fator preponderante na definição da quantidade de resíduos gerados. Uma combinação de fatores que atuam sobre o óleo derramado, tais como suas características físico-químicas, as condições climáticas e marítimas, a permanência do óleo no mar ou seu alcance à costa, o tipo de linha de costa onde venha a ocorrer o toque do óleo, os métodos de resposta empregados, são os fatores que na prática atuam em conjunto, determinam a tipologia e quantidades de resíduos oleosos gerados.

Dentre esses fatores, o toque de óleo na costa costuma ser o preponderante na geração de resíduos oleosos, daí a importância da estratégia de resposta de contenção e recolhimento, a fim de manter o óleo longe da costa. Ao chegar na costa, o óleo exige atividades de limpeza que por mais eficazes que sejam, tem a tendência de gerar grandes volumes de resíduos em parte em função do elevado quantitativo de pessoal envolvido, em parte por conta da utilização de materiais absorventes usados a granel como fibras, pó ou grânulos, ou em materiais absorventes confinados na forma de almofadas, rolos e travesseiros (NAS, 2022), mas em especial por conta da tipologia da linha de costa que pode ser atingida pelo óleo. Segundo Gundlach e Hayes (1978) e Mincarone et al. (2016), os ambientes costeiros são divididos em 10 tipologias diferentes, baseadas dentre outros fatores no tipo do substrato, que pode variar desde costões rochosos de alta a baixa declividade onde embora não ocorra penetração do óleo existe a necessidade de sua remoção, até planícies lamosas, pantanosas e manguezais onde o substrato mole permite o amplo espalhamento superficial do óleo, dificulta o acesso das equipes de limpeza e acentua a contaminação em meio à vegetação e fauna local. Entre esses extremos, são encontrados diversos tipos de praias

arenosas, com declividades e granulometrias distintas, praias mistas de cascalho e conchas, escarpas, enrocamentos, depósitos de tálus, em uma variabilidade de fisionomias que permite a penetração do óleo em profundidades tão diversas quanto alguns poucos centímetros a cerca de 1 metro. Em resumo, diversos são os fatores que determinam a maior ou menor geração de resíduos oleosos em relação ao tamanho do vazamento, destacando-se a estratégia de resposta escolhida, a experiência da equipe de resposta, a dominância do óleo apenas em superfície ou em contato com a linha de costa, o tipo de costa atingida, as características físico-químicas do óleo derramado, ou seja, um amplo conjunto de fatores que podem afetar diretamente a geração de uma maior ou menor quantidade de resíduos oleosos.

A Tabela 2 relaciona uma longa série de acidentes históricos, comparando as massas de óleo derramado com suas respectivas massas de resíduos sólidos e líquidos gerados pelas ações de resposta, mostrando a grande variabilidade da razão resíduos gerados em relação à massa de óleo derramado.

*Tabela 2: Massas de resíduos gerados por acidentes de vazamento de petróleo (Wadsworth, 2014).*

ANO	ACIDENTE	MASSA DE ÓLEO DERRAMADO (TON)	RESÍDUOS LÍQUIDOS GERADOS (TON)	RESÍDUOS SÓLIDOS GERADOS (TON)	TOTAL DE RESÍDUOS GERADOS (TON)	RAZÃO RESÍDUOS GERADOS / MASSA DE ÓLEO DERRAMADO
1993	Braer	86.200	-	2.000	2.000	0,02
2010	Deepwater Horizon	780.000	162.260	89.200	251.460	0,32
1996	Sea Empress	72.370	25.000	11.000	36.000	0,50
1978	Amoco Cadiz	227.000	100.000	100.000	200.000	0,88
1995	Sea Prince	5.500	2.000	5.100	7.100	1,29
1980	Tanio	13.500	-	28.000	28.000	2,07
2006	Solar 1	2.080	-	5.010	5.010	2,41
2002	Prestige	63.000	50.000	159.300	209.300	3,32
1999	Volgoneft 248	1.280	-	4.500	4.500	3,52
1989	Exxon Valdez	37.000	97.500	38.800	136.300	3,68
2007	Hebei Spirit	10.900	2.610	37.610	40.220	3,69
2001	Baltic Carrier	2.550	965	10.750	11.715	4,59
1988	Amazzone	2.100	-	13.000	13.000	6,19
2004	Athos 1	900	200	6.700	6.900	7,67
1997	Nakhodka	6.200	-	50.000	50.000	8,06
1999	Erika	19.800	1.100	200.000	201.100	10,16
1997	Nissos Amorgos	3.600	-	40.000	40.000	11,11
2007	Volgoneft 139	2.000	200	79.740	79.940	39,97

Dados históricos mostram que derramamentos de óleo que afetam a costa podem, em casos extremos, produzir dezenas de vezes mais resíduos do que o volume originalmente derramado, embora pequenos derramamentos também possam criar grandes quantidades de resíduos. No entanto, isso varia dependendo das características e comportamento do óleo, técnicas de resposta e manejo (IMO/UNEP, 2011).

Diante dos dados expostos na Tabela 2, fica claro que a prévia estimativa de geração de grandes massas de resíduos por conta das características dos diversos procedimentos de resposta assume um papel de grande relevância na medida em que a estrutura de resposta precisa ser dimensionada de forma a estar capacitada a receber essas massas e distintos tipos de resíduos. Não apenas os locais onde a estrutura de resposta deve estar localizada, mas em especial seu dimensionamento precisa estar de acordo com as necessidades efetivas. A Tabela 2 também demonstra inexistir uma relação direta entre as massas de óleo derramado e suas respectivas massas de resíduos gerados, como verificado nos acidentes com a plataforma *Deepwater Horizon* e os petroleiros Athos 1 e Volgoneft 139.

Embora essa preocupação de relacionar os tamanhos dos vazamentos com suas respectivas massas de resíduos gerados já seja uma realidade há tempos (Wadsworth, 2014; IPIECA-IOGP, 2015), o desenvolvimento de sistemas de modelagem de estimativa das massas de resíduos oleosos geradas ainda carece de estudos mais aprofundados.

De acordo com Metcalf (2014), embora o período posterior ao acidente com a plataforma *Deepwater Horizon* tenha gerado uma grande necessidade de desenvolver planos de contingência para responder aos resultados de um derramamento de óleo marinho, o conhecimento gerado limitou-se à teoria e à prática do gerenciamento de derramamentos de óleo e técnicas para gerenciar, remover e limpar os resíduos da deposição de óleo. Ocorre que a maioria dos planos de contingência para derrames de petróleo inclui informações muito limitadas sobre a gestão dos resíduos, restringindo-se referências a mecanismos e tecnologias que podem ser aplicados para tratar os resíduos que surgem após a remoção do óleo, ignorando orientações sobre processos de desenvolvimento de planos de gerenciamento de resíduos oriundos de

derramamentos de óleo. Agrava o fato de que para que qualquer planejamento eficaz de gerenciamento de resíduos possa ocorrer, são essenciais as estimativas das características e quantidades de resíduos oleosos tendo como base as características do óleo e o método adotado para sua remoção. As estimativas podem ser baseadas em modelagens de trajetória, como as desenvolvidas pelo modelo OSCAR, que embora apresente resultados que são basicamente expectativas, apresenta três benefícios:

- A criação de um modelo de estimativa de resíduos requer a identificação de todos os fatores que influenciam a geração de resíduos;
- A capacidade de considerar cenários alternativos durante o planejamento na fase anterior ao incidente;
- A capacidade de rapidamente ajustar as estimativas das quantidades de resíduos durante um incidente à medida em que dados mais precisos se tornam disponíveis, um processo contínuo.

Por sua vez, Chen et al. (2021), desenvolveram um modelo para otimizar o gerenciamento de resíduos oleosos da costa após derramamentos de óleo baseado em Inexact Inventory-Theory-based Optimization Model (ITOM), uma abordagem para o gerenciamento de inventários onde os modelos ou métodos usados para tomar decisões sobre o estoque reconhecem e lidam com incertezas e imprecisões nos dados ou nas suposições, ao contrário da teoria de inventário clássica, que assume que os parâmetros utilizados são conhecidos e corretos. O modelo foi desenvolvido para apoiar a equipe de gestão a selecionar as instalações mais apropriadas e o esquema ideal de alocação de resíduos ainda que sob incerteza, para atingir o custo total mínimo do sistema. Para acompanhar a demanda de tratamento de resíduos oleosos, as instalações de gerenciamento de resíduos oleosos podem ser abertas de forma seletiva, dependendo das circunstâncias. Os autores reconhecem que durante o processo de limpeza, uma grande quantidade de resíduos oleosos pode ser produzida e que essa quantidade de resíduos oleosos, dependente das propriedades do óleo, dos métodos de tratamento, do manuseio dos resíduos e das condições climáticas e geológicas do local do derramamento pode ser dezenas de vezes maior do que a quantidade de óleo derramado, conforme documentado em vários casos de derramamento. Apesar desse reconhecimento e da importância da prévia estimativa das quantidades de resíduos

para maximizar a qualidade da gestão de resíduos, o objetivo do estudo ficou restrito ao gerenciamento dos resíduos oleosos na resposta a derramamentos, à seleção das instalações de gerenciamento e alocação dos fluxos de resíduos no sistema de gerenciamento de resíduos oleosos para minimizar o custo do sistema, sem sequer superficialmente abordar a questão da estimativa das quantidades de resíduos potencialmente gerada.

Embora não relacionados diretamente com questão da quantificação da geração de resíduos, os estudos acima citados de Metcalf (2014) e Chen et al. (2021), que tratam respectivamente da gestão de resíduos em função da escolha das operações de resposta e da redução dos custos da gestão de resíduos, deixam clara não apenas a lacuna então existente na quantificação e qualificação dos resíduos oleosos, como também na importância do desenvolvimento de métodos ou ferramentas que permitam esse tipo de estimativa. O modelo de geração de resíduos ora apresentado nesta pesquisa pretende ocupar essa lacuna.

Dentre os acidentes listados na Tabela 2, são destacados a seguir dados do afundamento da plataforma Deep Water Horizon (DWH) em 2010 no Golfo do México, do vazamento do petroleiro Athos 1 em 2004 no Rio Delaware em New Jersey, EUA e do afundamento do petroleiro Volgoneft 139 em 2007, no Estreito de Kerch, entre a Ucrânia e a Federação Russa. Os três acidentes mostram situações bastante distintas no que se refere às massas de óleo derramadas e de suas respectivas massas de resíduos geradas. Ao passo que a DWH vazou para o ambiente uma massa de óleo estimada entre 540 e 810 mil toneladas e gerou pouco mais de 250 mil toneladas de resíduos, o vazamento do petroleiro Athos 1 vazou cerca de 900 toneladas e gerou cerca de 6.900 toneladas de resíduos, enquanto o afundamento do petroleiro Volgoneft 139 gerou um vazamento de 2.000 toneladas de óleo combustível e 79.940 toneladas de resíduos. Ou seja, taxas de resíduos gerados / óleo derramado respectivamente de 0,32, 7,67 e 39,67.

## **2.2 O AFUNDAMENTO DA PLATAFORMA DEEPWATER HORIZON EM 2010**

A liberação de milhões de barris de petróleo no Golfo do México por um período de 87 dias, entre 20 de abril a 15 de julho de 2010 a partir da plataforma Deepwater

Horizon (DWH) de propriedade da TransOcean e afretada pela British Petroleum (BP), gerou um grande volume de óleo recuperado, queimado, dispersado no mar, além de uma parte que ficou presa nas costas da Louisiana, Alabama, Mississippi, Flórida e Texas (Nixon et al., 2016). Embora não haja números precisos, as diversas estimativas de volume vazado dão conta de que 3,19 milhões de barris (DWH NRDAT, 2016), 4,127 milhões de barris (French-McCay et al., 2021), ou entre 4,6 e 6,2 milhões de barris (Griffiths, 2012) de óleo bruto tenham vazado para as águas do Golfo, equivalentes a uma massa entre 431 mil e 838 mil toneladas, considerando o óleo do poço Macondo com API 35° (Oldenburg et al., 2012). Desse total, pouco mais de 800 mil barris foram contidos e recolhidos (Crone e Tolstoy 2010). Ressalte-se que este foi o maior acidente marinho de “oil-spill” da história (Camilli et al., 2010), cerca de 20 vezes maior do que o ocorrido em 1989 com o petroleiro Exxon Valdez (Paine et al., 1996). Uma ampla variedade de ações de resposta ao vazamento foi empreendida, objetivando a contenção e recolhimento, dispersão em superfície e na cabeça do poço e queima local, fazendo uso de todas as técnicas então disponíveis.

Além dos esforços de contenção e recolhimento que conseguiram recuperar pouco mais de 800 mil barris, foram lançados cerca de 1,07 milhões de galões de dispersante Corexit 9500A e 9527A diretamente sobre o óleo em suspensão e 0,77 milhões de galões de dispersante Corexit 9500A diretamente sobre o vazamento, na cabeça do Poço Macondo (USCG 2011). Quanto à queima, foram conduzidos 411 focos de queima local, que em tese foram responsáveis pela queima de 250.000 bbl (Mabile e Allen 2010, USCG 2011). Cada técnica adotada gerou distintos tipos e volumes de resíduos, totalizando a geração de 80.276 toneladas de resíduos sólidos e 956.350 bbl de resíduos líquidos (Azwell et al. 2011). Nessa conta não estão incluídos os resultados das emissões atmosféricas dos 411 focos de queima “*in-situ*”, as quais incluem não apenas material particulado, óxidos de enxofre e nitrogênio, etc, mas também grande volume de gases de efeito estufa além de resíduos sólidos oriundos da queima das barreiras, que se estima terem removido cerca de 42 mil m<sup>3</sup> de petróleo (CEDRE, 2024a). Para implementação de toda essa gigantesca operação, foram lançados mais de 1.200 km de barreiras de contenção, utilizadas cerca de 9 mil embarcações, 2 plataformas de perfuração, 82 helicópteros, 47.849 pessoas envolvidas de 26 órgãos governamentais

norte-americanos. Apesar de todos esses gigantescos esforços e infraestrutura, cerca de 67% de todo o óleo foi considerado residual, dissolvido por degradação natural ou dispersado naturalmente (USCG 2011). Chegaram a ser utilizados simultaneamente 750 skimmers de todos os tipos disponíveis (CEDRE, 2024a). Esse enorme volume de óleo, correspondente a cerca de 2,14 a 4,15 milhões de barris de óleo bruto jamais foram recuperados, podendo estar até hoje dispersos no leito marinho, na coluna d'água e espalhado pelas diversas feições do litoral atingido.

Outra estimativa feita por Lehr et al. (2010) apresenta estimativas distintas quanto aos resultados das ações de resposta e óleo residual, conforme a Figura 1. Nessa estimativa, observamos que 51% dos 4 a 6 milhões de barris de óleo bruto jamais foram localizados (óleo residual + óleo evaporado ou dissolvido).

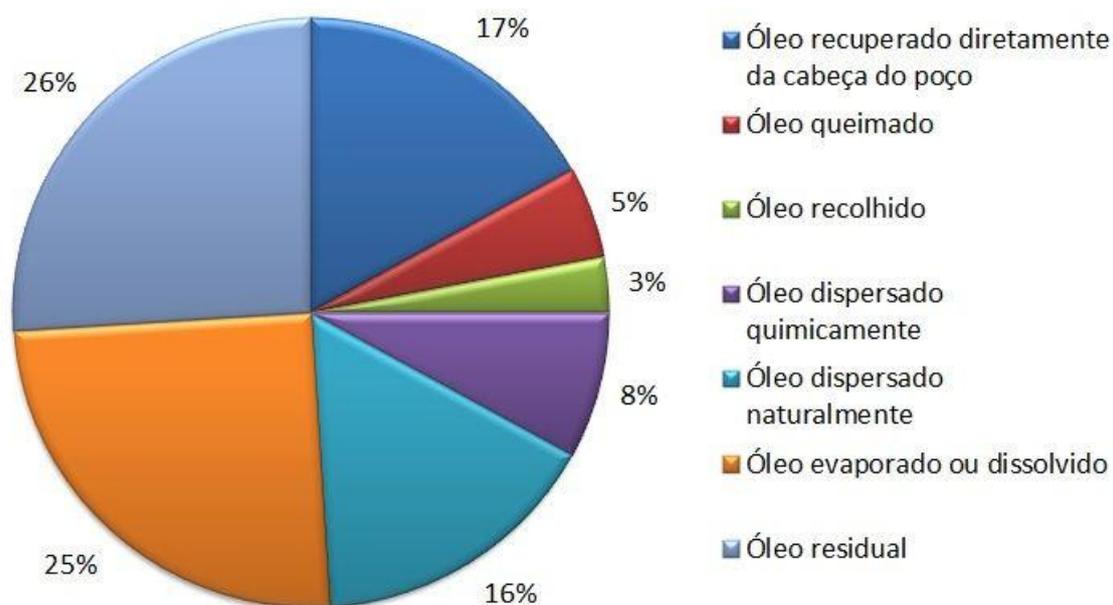


Figura 5: Resultados das ações de resposta e óleo residual (Lehr et al., 2010).

Dos 49% restantes, observamos a estimativa de 17% de óleo recuperado diretamente da cabeça do poço e 3% de óleo recolhido. Considerando a estimativa de 540.000 a 810.000 toneladas feita por Crone e Tolstoy (2010), chegamos a uma massa de 108.000 a 162.000 toneladas de óleo recuperado, na forma de resíduos oleosos.

Além dos extensos danos humanos, econômicos e ambientais, o acidente com a DWH foi um dos desastres humanos mais caros da história, chegando à cifra de US\$ 50.000.000.000,00 (cinquenta bilhões de dólares), composto por um fundo de US\$ 20.000.000.000,00 (vinte bilhões de dólares) para ajudar e compensar indivíduos por mortes e ferimentos e empresas por perda de receita. A BP precisou vender ativos no valor de US\$ 30.000.000.000,00 (trinta bilhões de dólares), destinados às várias dívidas resultantes do acidente. A empresa também financiou um projeto de pesquisa de dez anos com US\$ 500.000.000,00 (quinhentos milhões de dólares). O alegado objetivo do projeto era estudar o efeito ambiental do derramamento de óleo (Oudhuis e Tengblad, 2018).

Previsões ainda no ano de 2010 davam conta de que a BP provavelmente pagaria multas ao governo dos EUA sob a égide do "Clean Water Act" (40 C.F.R. Subchapters D, N, and O - Parts 100–140, 401–471, and 501–503) de até US\$ 4.700.000.000,00 (quatro bilhões e setecentos milhões de dólares) em multas civis apenas pelo volume de óleo derramado (Smith et al., 2011), apesar de inexistirem números precisos, oscilando entre 3,19 milhões de barris (DWH NRDAT, 2016) a 6,2 milhões de barris (Griffiths, 2012).

### **2.3 O VAZAMENTO DO PETROLEIRO ATHOS 1 EM 2004**

Em 26 de novembro de 2004, o petroleiro Athos 1 atingiu uma âncora submersa que estava abandonada, liberando para o Rio Delaware cerca de 1000 toneladas de petróleo bruto. O óleo se espalhou por cerca de 450 km nas costas da Pensilvânia, Delaware e Nova Jersey. A resposta ao acidente teve início imediato, sendo utilizados 5 navios para coleta do óleo ainda visível em superfície, 1.800 pessoas diretamente envolvidas na remoção inicial do óleo (ITOPF, 2023) e mais de 30 km de barreiras foram utilizadas (CEDRE, 2024b). As operações de limpeza do óleo superficial e na costa se estendeu ao longo do ano de 2005, em função da grande quantidade de cais e detritos ao longo dos trechos atingidos pelo óleo. Mais de 150 embarcações foram mobilizadas para auxiliar nas atividades de resposta. Das 1000 toneladas que vazaram, até 18 de janeiro de 2005 haviam sido recuperadas 168 toneladas de óleo, 256 toneladas de água oleosa e 28 toneladas de resíduos sólidos oleosos. (USCG, 2005a). As operações de

limpeza levaram um ano inteiro até que todos os 450 km de costa contaminada fossem considerados limpos (NOAA, 2023; NOAA, 2024).

As operações de limpeza tiveram início entre dezembro de 2005 a janeiro de 2006 pela remoção bruta do óleo em grande parte por métodos mecânicos e manuais, e tiveram sequência entre fevereiro e maio de 2006 pela limpeza das margens, com remoção manual de resíduos ainda existentes em áreas que já haviam sido previamente limpas e lavagem de alta pressão com água quente à vazão de 3,5 galões/minuto em pedras, muros de contenção e paredões rochosos. Ao término das lavagens em alta pressão, material absorvente era distribuído para recolher qualquer quantidade de óleo que ainda estivesse mobilizada. Esse processo foi utilizado ao longo de todos os 450 km de costa contaminada, daí o grande volume de resíduos sólidos oleosos e em especial água oleosa gerada (SAT, 2007). Em fevereiro de 2005, os custos da limpeza haviam atingido US\$ 100 milhões, cerca de 117.750 galões de óleo e resíduos líquidos oleosos e 12.068 toneladas de resíduos sólidos oleosos haviam sido recolhidos e 400 pessoas ainda formavam a equipe de limpeza (USCG, 2005b).

#### **2.4 O AFUNDAMENTO DO PETROLEIRO VOLGONEFT 139 EM 2007**

Em 11 de novembro de 2007, uma tempestade no Estreito de Kerch, situado entre o Mar de Azov e o Mar Negro, separando a Ucrânia da Federação Russa, gerou ventos de até 35 m/s e ondas de até cinco metros de altura. Essas condições foram suficientes para provocar um grave acidente envolvendo 13 embarcações, provocando o afundamento de quatro delas, o navio Volnogorsk, o navio Nahichevan, o navio Kovel e o petroleiro Volgoneft-139, do qual vazou para as águas do Mar Negro uma grande massa de óleo combustível com estimativas que variam de 1.300 a 2.000 toneladas (UNEP, 2008; Fashchuk et al., 2010; Korshenko et al., 2011; Wadsworth, 2014).

A falta de informações precisas sobre a massa de óleo combustível vazada levou as autoridades do evento a suspeitarem que hidrocarbonetos de outras das embarcações envolvidas também tenham vazado. Apenas 15 horas após o início do vazamento, a costa sul da Ilha Tuzla, situada a menos de 10 km ao norte do local do

vazamento já estava coberta de óleo, e em 17 de novembro o óleo já havia atingido a ponta de Arshintsevo na Criméia, 25 km ao norte. A coleta de óleo acumulado na Criméia ao longo do Estreito de Kerch estendeu-se até o final de novembro, quando foi totalizada uma massa de 4.000 toneladas de areia contaminada a uma concentração em torno de 15% a 20%, o que indica um acúmulo de óleo no território ucraniano de 600 a 800 toneladas de óleo combustível. Em 15 de novembro, o rebocador Svetlomor-3 conseguiu coletar 500 m<sup>3</sup> de água oleosa e o petroleiro Volgoneft-119 10 toneladas de óleo combustível. Barreiras de contenção com 400 m de extensão e 1 tonelada de material absorvente foram instaladas na área entre a proa do petroleiro Volgoneft-139 e a ilha Tuzla. Pelo lado russo, apenas no dia 14 de novembro 8,5 km de costa que estavam contaminadas foram limpos, gerando 1.500 toneladas de areia contaminada, totalizando 3.300 toneladas de areia contaminada recolhida desde o início das operações de limpeza (Fashchuk, 2011). Ao final das operações, pelo lado da Rússia as forças militares e equipes de emergência civil haviam retirado cerca de 70 mil toneladas de detritos oleosos e areia contaminada de boa parte da costa da península de Taman e das pontas de Tuzla e Chuska, ao passo que as equipes ucranianas conseguiram recolher cerca de 6.500 toneladas de resíduos oleosos em especial da Ilha de Tuzla (IOPC, 2013).

## **2.5 CONCLUSÕES A PARTIR DOS ACIDENTES COM A PLATAFORMA DEEPWATER HORIZON E COM OS PETROLEIROS ATHOS 1 E VOLGONEFT-139**

As ações de resposta a um vazamento de petróleo inevitavelmente geram distintos volumes e tipos de resíduos, os quais são consequência direta de diversos fatores, como tipo e volume de óleo derramado, distância do vazamento até a costa, toque de óleo na costa, impedimentos legais e operacionais que limitem o uso de dispersantes e queima local, tempo de resposta, condições meteoceanográficas, treinamento e quantidade do pessoal envolvido nas operações de limpeza, eficácia e efetividade no uso dos recursos de resposta. Um conjunto de fatores tão amplo e diversificado pode explicar os motivos pelos quais vazamentos de petróleo geraram volumes de resíduos tão distintos quanto os que foram gerados pela plataforma DWH e pelos petroleiros Athos 1 e Volgoneft-139.

### **2.5.1 O PETROLEIRO ATHOS 1**

O vazamento do petroleiro Athos 1 mostra a relação direta entre grande geração de resíduos e o volume de toque do óleo na costa. Além de o vazamento ter ocorrido em ambiente fluvial, onde a proximidade com a costa é bastante reduzida, o vazamento se espalhou por uma extensão de 450 km contaminando praias, zonas alagadiças, instalações portuárias, costões rochosos ao longo do trecho afetado. Outro fator relevante é o longo período dispendido pelas ações de resposta, que acentuou a dispersão do óleo. Cerca de um ano inteiro foi necessário para dar como encerradas as operações de limpeza. Agrava o fato de que ao longo desse tempo boa parte das operações de limpeza foi realizada por meio da aspersão de água quente nos pontos contaminados por óleo, gerando grandes volumes de água oleosa. O intrincado percurso do Rio Delaware que envolve diversos cursos d'água contribuintes, instalações industriais e diversas ilhas com restos vegetais e grande variedade de material flutuante contribuiu para a elevada geração de resíduos pela contaminação desses detritos e seu necessário recolhimento (Wadsworth, 2014). Um total de 11.869 aves morreram por contaminação por óleo e 14,7 km<sup>2</sup> de costa foram expostas ao óleo, dos quais 5,8 km<sup>2</sup> eram substratos areno-lamosos, que agregam grandes volumes de óleo (USCG, 2010a). Além disso, grandes quantidades de equipamentos e recursos de resposta, como mais de 30 km de barreiras (CEDRE, 2024b) e mantas absorventes e EPI's foram descartados, contribuindo para o grande volume geral de resíduos contaminados que foi gerado (Wadsworth, 2014).

### **2.5.2 A PLATAFORMA DEEPWATER HORIZON (DWH)**

Tanto quanto o vazamento de óleo da DWH em si, as operações de resposta geraram números sem precedentes na indústria petrolífera. O uso de dispersantes totalizou mais de 11 mil m<sup>3</sup> de dispersantes Corexit 9500A e 9527A, parcialmente aplicados na cabeça do poço e parcialmente no óleo que subiu à superfície, em uma área total de quase 800 km<sup>2</sup> (Houma, 2010). Ainda em abril de 2010, nos primeiros dias de operações, o recolhimento de óleo por skimmers já totalizava 26 embarcações operando em águas profundas, sete rebocadores dedicados e três barcas de armazenamento de petróleo. Até meados de julho de 2010 o número de embarcações

operando com skimmers chegou a 593 unidades. Foram ancorados mais de 1.100 km de barreiras oceânicas e 1.700 km de barreiras absorventes (USCG 2011).

Em maio de 2010, quando o óleo pela primeira vez chegou à costa, duas semanas após o início do vazamento, já estava implementado o plano de ação “Shoreline Cleanup and Assessment Technique (SCAT)” que previa em suas duas primeiras etapas a remoção do óleo flutuante junto à linha costeira, em sua etapa 3 a limpeza contínua do óleo em praias, pântanos e estruturas de linha costeira feitas pelo homem. Em sua fase 4, a final, previa a reavaliação das áreas afetadas e o encerramento das operações (Michel et al., 2015).

Até fevereiro de 2014, o total de resíduos oleosos gerados pelas operações de limpeza da DWH já havia chegado a mais de 291 mil toneladas (Michel et al., 2015), portanto, uma estimativa ainda maior do que a apresentada por Wadsworth (2014), conforme Tabela 2. O material contaminado por óleo incluía água oleosa, vegetação e detritos oleados, EPI's descartados contaminados, além de barreiras de contenção e equipamentos de resposta igualmente contaminados e descartados (USEPA, 2011). A remoção de óleo especificamente a partir de praias arenosas gerou mais de 45 mil toneladas de material contaminado (Michel et al., 2015).

### **2.5.3 O PETROLEIRO VOLGONEFT-139**

O afundamento do petroleiro Volgoneft-139 em 11 de novembro de 2007 foi causado por uma forte tempestade que atingiu o Estreito de Kerch, que liga o Mar de Azov ao Mar Negro entre a Ucrânia a Oeste e a Rússia a Leste. Ventos de mais de 110 km/h geraram ondas com mais de 5 metros de altura, em águas cujas profundidades oscilam entre 7 e 12 metros. Solto de suas amarras, o navio entrou em deriva até que o fundo do casco simples do antigo petroleiro se rompeu após atingir uma âncora submersa abandonada, lançando para as águas do Estreito de Kerch cerca de 1.300 toneladas de óleo combustível das 4.800 toneladas transportadas, sendo rapidamente espalhadas pelo estreito em função dos ventos fortes e das ondas, resultando em rápida contaminação da costa. Já no dia seguinte ao acidente, o óleo já havia ultrapassado a

ilha de Tuzla, situada a apenas 5 km do acidente e se estendia até as Pontas de Tuzla e Chushka, situadas entre 6 km e 20 km do local do acidente e mais ao norte, às margens do Mar de Azov.

Em 13 de novembro, tão logo as condições climáticas permitiram, foram iniciadas as operações de limpeza. O óleo combustível agregado ao solo contaminado foi juntado em pilhas para serem removidos por caminhões e levados para descarte. Nos dias 12 e 13 de novembro, mais de 900 toneladas de solos contaminados foram coletadas na costa do Estreito de Kerch. O óleo sobrenadante foi recolhido com o uso de material absorvente formado por serragem triturada e turfa, coletado por embarcações especializadas e posteriormente descarregado em terra. Cerca de 2,5 toneladas de óleo emulsionado foi coletado. Outro material sobrenadante encontrado foram diversos aglomerados de óleo combustível misturado com algas marinhas encontrados na costa na forma de grandes montes flutuantes com cerca de 10 km de comprimento e 3 a 5 m de largura, 2.500 metros de comprimento e 1 a 3 metros de largura, 2000 metros de comprimento e 0,5 a 10 metros de largura, 500 metros de comprimento e 0,5 a 25 metros de largura, 3.500 metros de comprimento e 5 metros de largura, totalizando cerca de 80.000 m<sup>2</sup> de material contaminado.

Na segunda metade de novembro, as mais de duas mil pessoas envolvidas nas operações de limpeza já haviam conseguido limpar 26 km de costas e 7.019 toneladas de resíduos já haviam sido coletados desde o início das operações. Até então, mais de mil aves mortas já tinham sido encontradas. Estimativas dão conta de que até 30.000 aves marinhas foram mortas pela contaminação por óleo entre novembro e dezembro de 2007.

A remoção de óleo das areias das praias era feita com equipamentos pesados, o que deixava a praia revirada e com áreas com óleo ainda visível, fazendo supor que a remoção manual traria melhores resultados, ainda que mais lenta e intensiva. O armazenamento dessa areia contaminada deveria ser temporário, pois até aquele momento ainda não estava definido como nem onde o solo contaminado seria limpo.

Mais de 2,5 mil pessoas e mais de 300 unidades técnicas atuaram na operação de limpeza das linhas de costa atingidas pelo óleo. Equipes especializadas e de resgate, formações militares, brigadas de combate a incêndios, cadetes da Academia Marítima e funcionários governamentais, bem como organizações locais e internacionais como WWF, Greenpeace, Birds International, Fundo Internacional para o Bem-Estar Animal (IFAW) e Sea Alarm, juntamente com voluntários e funcionários governamentais de diferentes cidades, trabalharam na limpeza da costa e na recuperação da vida selvagem. Em meados de dezembro, após a limpeza de 53 km de costa contaminada e o acúmulo de 40 mil toneladas de resíduos oleosos, dois locais para armazenamento desses resíduos ainda estavam sendo providenciados. Já naquele momento as conclusões que as autoridades chegavam era que da forma como estavam sendo conduzidas, as operações de limpeza poderiam ter consequências negativas e que eram necessárias regras para o manuseio de cargas ambientalmente perigosas. Prova disso é que resíduos oleosos foram deixados em sacos abertos em locais sensíveis próximos a áreas de lazer, revelando desinformação sobre a localização das instalações de armazenamento, e ausência de uma gestão adequada dos resíduos. Em julho de 2008, passados 8 meses desde o acidente, uma inspeção da UNEP no Porto de Kerch identificou que 1.500 toneladas de resíduos ainda precisavam ser processadas (Fashchuk, 2011).

#### **2.5.4 CONCLUSÕES**

Considerando-se o imenso volume de óleo derramado, era de se esperar que o afundamento e vazamento de óleo da plataforma DWH gerasse um correspondente e proporcional volume de resíduos. No entanto, ao passo que a geração de resíduos nos acidentes com os petroleiros Athos 1 e Volgoneft-139 geraram volumes de resíduos quase 8 e 40 vezes maiores que os volumes de óleo vazados, o afundamento da Deepwater Horizon gerou um volume de resíduos de apenas 0,32 vezes o volume de óleo vazado. A questão que se esconde por trás desses números é que eles são números relativos, que examinados isoladamente dão a entender que a geração de resíduos relativos aos acidentes com os petroleiros Athos 1 e Vogoneft-139 teriam sido muito mais críticas do que aqueles gerados pelo afundamento da DWH. No entanto, ao serem apresentados de forma absoluta, fica claro que as mais de 250 mil toneladas de resíduos

gerados pela DWH são muito mais impactantes do que as quase 7 mil e 80 mil toneladas geradas pelos petroleiros Athos 1 e Vogoneft-139, além de exigir uma infraestrutura de resposta e gerenciamento de resíduos muito maior e mais organizada do que aquelas adotadas para os acidentes com os dois petroleiros.

Há que se levar em consideração que embora esses três exemplos tenham como fonte da contaminação por óleo dois petroleiros, onde o volume do poluente é conhecido e fixo, e uma plataforma de perfuração, onde o volume do poluente depende da vazão do poço e do tempo requerido para controle do vazamento, os volumes de resíduos respectivamente gerados não são necessariamente proporcionais aos volumes de óleo vazados. Os relatos dos acidentes apresentados nos itens 2.2 a 2.4 e suas respectivas conclusões nos itens 2.5.1 a 2.5.3 mostram a grande variabilidade de resultados em função da disponibilidade de materiais de resposta, das condições meteoceanográficas, da quantidade e capacitação do pessoal envolvido nas operações de resposta, da pré-existência de uma estrutura de comando (ICS – Incidente Command System), fatores tais que implicaram na maior ou menor taxa de geração de resíduos oleosos.

O que deve ficar claro dessa situação é que os três acidentes foram críticos, na medida em que exigiram cadeias de gestão de resíduos capazes de suportar os volumes gerados independente de sua magnitude. Nesse aspecto, começa a ficar clara a importância de uma ferramenta que permita a estimativa prévia do volume de resíduos a serem gerados em caso de acidentes, de forma a permitir a também prévia organização de uma estrutura de resposta que seja suficientemente adaptável aos diversos volumes de resíduos que possam ser gerados por um vazamento.

O tamanho e alcance do vazamento da Deepwater Horizon caracterizaram-no como “Spill of National Significance (SONS)”, um acidente tão complexo que requereu uma coordenação extraordinária de recursos federais, estaduais, locais e da parte responsável para conter e limpar o vazamento. Para tal, existe a Regulamentação 40 CFR § 300.5 (USEPA, 2013). No âmbito de um vazamento de petróleo classificado como “SONS”, sua magnitude e complexidade exigem uma infraestrutura geral que permita o

correto gerenciamento dos resíduos em todas as suas fases de manuseio, transporte, armazenamento, tratamento e disposição final, o que bastante contribui para sua minimização. Por conta disso, as operações de resposta foram coordenadas por um Comando Nacional de Incidentes (National Incidents Command – NIC), que no pico das operações de resposta, coordenou 47.849 pessoas que trabalharam no total, mais de 9 mil embarcações que foram empregadas nos esforços de resposta, 835 skimmers que foram usados, mais de 1.100 km de barreiras fixas e 2.800 km de barreiras absorventes que foram lançadas, 82 helicópteros, quase 7.000 m<sup>3</sup> de dispersantes, um volume tão elevado que precisou ser trazido de 15 pontos distintos dentro dos EUA, incluindo o Alasca e o Havaí, além de 6 outros países da Europa, Ásia e Oceania (USCG, 2011).

A estrutura de comando e controle que foi criada foi colocada à disposição do Coordenador Federal de Cena (Federal On-Scene Coordinator - FOSC) para abordar as maiores necessidades operacionais e maximizou o entrosamento entre as agências federais e estaduais dos cinco estados limítrofes ao Golfo do México que atuaram como curadores<sup>3</sup> para o incidente do Deepwater Horizon (DWHNRDAT, 2016):

- Federais:
  - ✓ U S Department of the Interior (USDI);
  - ✓ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA);
  - ✓ U S Department of Agriculture (USDA);
  - ✓ U S Environmental Protection Agency (USEPA);
- Texas: Parks and Wildlife Department (TPWD), General Land Office (TGLO), e Commission on Environmental Quality (TCEQ);
- Louisiana: Coastal Protection and Restoration Authority (CPRA), Oil Spill Coordinator's Office (LOSCO), Department of Environmental Quality (LDEQ), Department of Wildlife and Fisheries (LDWF), e Department of Natural Resources (LDNR);
- Mississippi: Department of Environmental Quality (MDEQ);

---

<sup>3</sup> Os Curadores do Deepwater Horizon são entidades governamentais autorizadas pelo Oil Pollution Act de 1990 (<https://uscode.house.gov/view.xhtml?path=/prelim@title33/chapter40&edition=prelim>) a atuar como curadores em nome do público para avaliar os danos aos recursos naturais resultantes do incidente de poluição por petróleo da Deepwater Horizon e, em seguida, desenvolver e implementar um plano de restauração para compensar esses danos (DWHNRDAT, 2016).

- Alabama: Department of Conservation and Natural Resources (ADCNR) e Geological Survey of Alabama (GSA);
- Florida: Department of Environmental Protection (FDEP) e Fish and Wildlife Conservation Commission (FWC)

Essas agências Federais e Estaduais atuaram em conjunto entre si e com outras instituições federais, estaduais, instituições de pesquisa e acadêmicas, empresas de limpeza e remediação, de logística e transporte, diversas como o World Wildlife Fund (WWF), The Nature Conservancy (TNC), organizações militares, e mais uma miríade de voluntários anônimos que deram suas contribuições às operações de resposta.

A aplicação prática do SONS (Spill of National Significance), tão importante para o alcance dos resultados das operações de resposta à DWH foi previamente desenvolvida ao longo de um ambiente de exercícios, mas evoluiu especialmente ao longo das operações de resposta ao afundamento da DWH. Ainda que esse evento tenha sido o primeiro evento classificado como SONS e pela primeira vez tenha sido implantado um NIC (National Incident Commander) (USCG, 2010b), exercícios regulares de SONS já eram realizados desde a revisão do Plano Nacional de Contingência (National Contingency Plan - NCP) realizada após o acidente com o petroleiro Exxon Valdez, em 1989. Vale destacar que o NCP vigora nos EUA desde 1968 (USCG, 2011). Ou seja, até a ocorrência do acidente com a DWH, cerca de 30 anos de experiência em exercícios de resposta já se acumulavam até a colocação em prática dos conhecimentos gerados.

Essa resumida<sup>4</sup> explanação sobre a extensa e ampla infraestrutura disponível e a competência como foram conduzidas as operações de resposta ao acidente com a plataforma *Deepwater Horizon* visam mostrar que em um acidente desse porte a baixa geração relativa de resíduos é fruto de uma infraestrutura de resposta muito bem-organizada e treinada, o que em vias de regra não é a praxe. Não fosse a aplicação prática do SONS (Spill of National Significance), e seus muitos anos de treinamento,

---

<sup>4</sup> A quem interessar o aprofundamento das informações sobre o acidente com a *Deepwater Horizon*, sugiro a leitura completa das referências USCG 2011 e DWHNRDAT 2016 que apresentam informações detalhadas sobre a estrutura de resposta empregada e resultados do acidente.

possivelmente (e isso é apenas uma hipótese), a geração de resíduos poderia ter atingido níveis intoleráveis, em volumes que poderiam chegar à casa dos milhões de metros cúbicos, algo absolutamente sem precedentes.

Independente de toda essa gigantesca infraestrutura disponibilizada que se mostrou eficiente e eficaz no alcance esperado das operações de resposta, a disponibilização de uma ferramenta que permitisse a prévia visualização do montante e tipologia de resíduos gerados certamente seria um elemento importante a agregar valor às operações de resposta. O planejamento prévio e a execução prática da cadeia de gestão de resíduos baseados na prévia estimativa dos volumes e tipos de resíduos poderão vir a ser um importante elemento de apoio ao planejamento e execução das operações de resposta, em especial aqui no Brasil, onde ainda não dispomos de uma infraestrutura de resposta tão complexa e profissional como a que foi aplicada no acidente da DWH.

Em contraponto às ações de resposta da DWH, as operações de limpeza dos petroleiros Athos 1 e Volganeft-139 são cercadas de circunstâncias bastantes distintas daquelas referentes à DWH. As operações de limpeza dos petroleiros Athos 1 e Volganeft-139 foram responsáveis pelo recolhimento e limpeza de massas de óleo bruto e óleo combustível de respectivamente 900 e 2000 toneladas, que em tese poderiam ter gerado massas reduzidas de resíduos, caso um bom sistema de gestão de resíduos estivesse disponível. No entanto, as ações de resposta foram cercadas de ações mais diretas e voluntárias, sem o grau de planejamento e complexidade aplicados no caso da DWH.

É bem verdade que há grandes diferenças entre vazamentos oriundos das atividades de perfuração e produção de petróleo, nas quais os poços têm coordenadas geográficas fixas, de vazamentos oriundos de petroleiros que são responsáveis pelo deslocamento de sua carga de óleo por centenas e até milhares de quilômetros, muitas vezes de forma transfronteiriça. No caso das plataformas de petróleo, a modelagem da dispersão de óleo é um processo relativamente simples e bem conhecido que permite a estimativa dos volumes e da dispersão do óleo e por meio de seus respectivos balanços

de massa estimar os volumes de óleo em superfície, que é o alvo do modelo ora apresentado. Dessa forma, com base nessa estimativa, os correspondentes volumes e tipos de resíduos gerados pelo recolhimento desse óleo superficial podem ser estimados, contribuindo para o planejamento e a montagem da estrutura de resposta e gestão dos resíduos que se estima serem gerados.

Por outro lado, no caso dos petroleiros, uma vez que são instalações em movimento, a modelagem da dispersão do óleo pode ser um tanto quanto mais complexa, por não haver um ponto preciso de um eventual vazamento do óleo. No entanto, as autoridades marítimas locais sabem previamente as rotas regulares de deslocamento dessas embarcações, e tem recursos para definir seus pontos litorâneos de maior sensibilidade ao longo dessas rotas. A partir desses pontos, estruturas de resposta adequadas aos volumes de óleo em trânsito nessas rotas regulares podem ser dimensionadas e disponibilizadas.

As diferenças entre os acidentes dos petroleiros Athos 1 e Volgoneft-139 são marcantes, mas guardam entre si algumas similaridades. O vazamento do Athos 1, provocado pelo rompimento do casco por uma âncora submersa, ocorreu em ambiente fluvial, onde o deslocamento do óleo para jusante do local do acidente em muito contribuiu para o rápido espalhamento do óleo por centenas de quilômetros rio abaixo, e a intensa contaminação das margens ao longo do percurso do óleo. No caso do Volgoneft-139, o afundamento foi causado por severas condições climáticas no Estreito de Kerch, entre a Ucrânia e a Rússia, causando o colapso de seu casco e a imediata liberação de óleo para o mar. As condições climáticas provocaram o rápido espalhamento do óleo por centenas de km<sup>2</sup>, atingindo ambas as costas, ucraniana e russa. A falta de coordenação entre as autoridades ucranianas e russas contribuíram para o agravamento do acidente, aumentando sobremaneira a geração de resíduos oleosos e causando sua gestão muito lenta e ineficiente.

Em ambos os casos, ficou claro a falta de sistemas de coordenação das respostas a vazamentos e de gestão dos resíduos. Essa situação de falta de controle destaca a importância de estimativas prévias dos possíveis volumes de resíduos em casos de

acidentes, ainda que transfronteiriços, como é o caso do Volgoneft-139. Uma prévia visão dos volumes de resíduos que poderiam ser gerados por acidentes como os que ocorreram poderia contribuir para um planejamento prévio de uma infraestrutura de resposta suficientemente flexível para situações extremas, como ocorreram. Diante disso, a disponibilidade de um método que permitisse a estimativa de geração de resíduos em função das operações de limpeza de seus vazamentos certamente teria sido uma ferramenta eficaz na preparação, dimensionamento e gestão da cadeia de resíduos, na medida em que tendo uma expectativa prévia minimamente realista dos volumes de resíduos a serem gerados, permitiria um fluxo adequado entre a geração e a recepção dos resíduos, evitando gargalos que eventualmente podem contribuir para aumento de custos, tempo, riscos e estresse para as equipes envolvidas, além do próprio volume de resíduos.

É diante dessa necessidade que se encaixa o presente estudo, que apresenta um sistema de modelagem focado na contabilização prévia dos resíduos oleosos que venham a ser gerados a partir das operações de contenção e recolhimento, responsáveis pelo recolhimento da fração do óleo vazado que se mantenha em superfície, em geral a primeira fonte de geração de resíduos oleosos.

## **2.6 INTEMPERISMO E PROCESSOS FÍSICO-QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO ÓLEO EM AMBIENTE MARINHO**

Um derramamento de óleo em ambiente marinho tem seu comportamento determinado por fatores físico-químicos e biológicos condicionados pelas características do óleo, bem como pelas condições hidrometeorológicas e ambientais, tais como gradientes de salinidade, altura e frequência das ondas, intensidade e direção dos ventos, intensidade e direção das correntes marinhas, e radiação solar. Além disso, outro fator determinante é a forma como ocorre a descarga do óleo no ambiente marinho, seja ela instantânea ou contínua, na superfície ou em profundidade. Uma vez que tenha ocorrido o vazamento, sobre a massa de óleo derramada diversos processos físico-químicos começam a atuar por meio de espalhamento, evaporação, emulsificação, dissolução, foto-oxidação, biodegradação e sedimentação em paralelo a

processos físicos de transporte como dispersão natural, emersão, mistura turbulenta e transporte (Keramea et al., 2021).

### **2.6.1 ESPALHAMENTO**

O processo de espalhamento é um dos mais significativos nas primeiras horas subsequentes a um derramamento de óleo, pois é o responsável pela disseminação da mancha oriunda do vazamento, sendo um processo regulado pela viscosidade e tensão superficial do óleo. Em condições ambientais mais rigorosas, a propagação da mancha, bem como a sua evaporação e dissolução, pode ocorrer mais rapidamente, dependendo das propriedades iniciais do produto. É importante destacar que o espalhamento é um fenômeno físico que pode desencadear outros processos que contribuem para a dissipação da mancha de óleo (Simecek-Beatty e Lehr, 2017; Glug e Was, 2018).

### **2.6.2 EVAPORAÇÃO**

A evaporação é um processo pelo qual os compostos leves e médios presentes no óleo são transferidos da fase líquida para a atmosfera em forma gasosa enquanto seus componentes mais pesados permanecem no mar, e sua taxa é influenciada pela velocidade de espalhamento, bem como pelas condições climáticas e do mar. A volatilidade do óleo, que é uma função da sua composição, é o principal fator que influencia a evaporação. Esse processo é responsável pelas mudanças mais significativas na composição do óleo, sendo particularmente relevante nos primeiros dias que se seguem a um derramamento (Mishra e Kumar 2015, Zafirakou 2018).

### **2.6.3 EMULSIFICAÇÃO**

Emulsificação é o processo de mistura de dois líquidos que a princípio seriam imiscíveis, como a água e o óleo, causado pela turbulência na superfície do mar. Isso resulta na suspensão de gotículas de água no óleo, formando uma emulsão conhecida como "mousse" (Mishra 2015, Zafirakou 2018). Essa emulsão é geralmente muito viscosa e persistente em comparação com o produto original. A emulsificação dificulta

a dissipação da mancha de óleo, aumentando sua persistência e volume. Além disso, ela interfere na ação de outros processos que poderiam ajudar a dissipar o óleo. Esse fenômeno ocorre em função da turbulência na superfície do mar causada pelas ondas, além do significativo papel que a composição química do óleo, sua viscosidade e temperatura ambiente desempenham no processo (Daling et al. 2003, Ashrafizadeh 2012, Komaiko et al. 2015).

#### **2.6.4 DISSOLUÇÃO**

A dissolução representa o fracionamento de substâncias presentes no óleo entre as fases oleosa e aquosa. Esse processo é afetado pela composição do óleo, temperatura, composição química da água, grau de espalhamento da mancha e taxa de dispersão. Como o petróleo e seus derivados são pouco solúveis em água, limitando-se a frações inferiores a 1 mg/L, a dissolução geralmente é um dos processos menos importantes na dissipação da mancha de óleo. No entanto, em função das altas volatilidade e solubilidade dos Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) e Monoaromáticos (BTEX), os quais são os elementos mais tóxicos do petróleo para os organismos aquáticos, embora em termos de balanço de massa a dissolução seja pouco relevante, em termos de avaliação de impacto ambiental a dissolução tem um papel relevante (ITOPF 2014). Hidrocarbonetos de baixa massa molecular como o benzeno e o tolueno são razoavelmente solúveis em ambientes marinhos, dissolvendo-se poucas horas após o derramamento (Mishra e Kumar 2015).

#### **2.6.5 FOTO-OXIDAÇÃO**

A foto-oxidação é um processo em que as substâncias presentes na mancha de óleo sofrem uma reação química com o oxigênio do ar acelerada pela luz solar, resultando na formação de produtos solúveis em água (Spaulding 1988). A velocidade de foto-oxidação depende em especial da composição inicial do petróleo, da espessura do óleo em suspensão e de reações fotoquímicas, que são influenciadas pela exposição à luz solar (ITOPF 2014). Os produtos gerados pela oxidação possuem maior solubilidade em água do que os compostos originais do óleo. Quando ocorre em camadas grossas de

óleo de alta viscosidade ou em emulsões, a oxidação aumenta a persistência da mancha no ambiente, dificultando sua degradação e gerando bolas de piche (“tar balls”) encontradas nas praias mesmo muito tempo após a ocorrência do derramamento (Zafirakou 2018, Ward e Overton 2010).

#### **2.6.6 BIODEGRADAÇÃO**

A biodegradação é o processo pelo qual o óleo é decomposto pela atividade de bactérias e outros organismos que ocorrem naturalmente no ambiente, especialmente na interface óleo-água. A taxa de biodegradação é influenciada pela composição química do óleo derramado, sua solubilidade em água e por fatores ambientais como temperatura, níveis de oxigênio, disponibilidade de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo e pela disponibilidade e tipo de microrganismos presentes nas águas afetadas (Das e Chandran 2011, Lawniczak et al. 2020, Bacosa et al. 2022). A biodegradação de óleo por microrganismos nativos é um dos processos naturais mais relevantes no sentido de reduzir os efeitos ambientais de derramamentos de óleo em ambiente marinho a longo prazo (Das e Chandran 2011, Lawniczak et al. 2020). A relação entre aplicação de dispersantes químicos e a biodegradação ainda é tema controverso, na medida em que se por um lado a aplicação de dispersantes químicos aumenta a interface água-óleo disponível à ação de microrganismos, por outro lado a forma como a toxicidade desses dispersantes atua sobre as espécies de microrganismos e sua capacidade de degradar o óleo não é suficientemente entendida (Kleindienst et al. 2015, Rahsepar et al. 2016).

#### **2.6.7 SEDIMENTAÇÃO**

A interação entre gotículas de óleo espalhadas pela coluna d’água com partículas de sedimentos e matéria orgânica em suspensão pode tornar essas partículas densas o suficiente a ponto de provocar seu lento afundamento até o fundo do mar. Em águas rasas e regiões estuarinas a disponibilidade de sólidos em suspensão pode provocar condições ainda mais favoráveis à sedimentação. Em regiões de desembocaduras de rios as gotículas de óleo podem ter maior chance de sedimentação, em função das águas

salobras com menor salinidade e gravidade específica. Também pode ocorrer a ingestão do óleo por organismos planctônicos, sendo incorporado a pellets fecais que uma vez expelidos tendem ao afundamento (ITOPF 2014). A formação de sedimentos agregados ao óleo é um processo de grande importância na medida em que limita o transporte do óleo para áreas bentônicas mais próximas à costa (Payne et al. 2003), cuja sedimentação causa graves impactos no ambiente marinho, sendo em função disso um importante processo de análise do impacto biológico.

#### **2.6.8 DISPERSÃO**

A dispersão ocorre quando a espessura do filme oleoso chega a cerca de 0,1mm e se desintegra em manchas menores por efeito de ações turbulentas sobre a superfície da água que quebram a mancha de óleo em partículas de tamanhos diversos na coluna d'água. As gotas maiores ressurgem para a sua região original, enquanto as menores se espalham na extensão da coluna d'água (Röhrs et al. 2018).

#### **2.6.9 EMERSÃO DO ÓLEO**

A emersão do óleo é o resultado do movimento das gotas de óleo desde a coluna d'água até a superfície do mar. Em função de sua flutuabilidade, as gotas de óleo submersas entram em contato com outras gotas aumentando de tamanho e gerando gotas maiores cuja diferença de densidade com a água provoca sua ascensão. Gotas de pequenas dimensões permanecem submersas por períodos maiores, só conseguindo emergir com a diminuição da turbulência das ondas (Johansen et al. 2015)

#### **2.6.10 MISTURA TURBULENTA**

A mistura turbulenta promove a movimentação das gotas de óleo ao longo da coluna d'água, em movimentos ascendentes e descendentes, ao passo que a flutuabilidade das gotas de óleo apresenta um movimento meramente de estabilidade ou suave ascensão. Em especial são as gotículas de óleo de menores dimensões que são mais afetadas, limitando sua capacidade de emersão (Tkalic e Chan 2002, Johansen et

al. 2015). A mistura turbulenta tem uma ação relevante na troca de gotículas de óleo em circulação vertical na coluna d'água com o óleo disperso em superfície (Röhrs et al. 2018).

### 2.6.11 TRANSPORTE

O óleo derramado no mar é transportado de distintas formas nos gradientes vertical e horizontal, sendo de extrema importância a compreensão desses padrões de circulação, uma vez que essa circulação é um dos mais importantes parâmetros na definição do alcance e intensidade do derramamento (Li et al. 2013). O transporte horizontal é determinado pelos fenômenos do espalhamento e da advecção, ao passo que o transporte vertical é determinado pelos fenômenos da dispersão vertical, mistura turbulenta e emersão. Correntes oceânicas, ventos e ondas são determinantes no processo de advecção, enquanto o espalhamento é determinado especialmente pela viscosidade e tensão superficial do óleo. O transporte vertical tem efeito direto sobre o transporte horizontal, na medida em que seus fenômenos geradores determinam as características da mistura oleosa em superfície (Röhrs et al. 2018). A ação do vento costuma ser associada apenas à fração superficial da mancha de óleo, ao passo que as correntes oceânicas e a deriva de Stokes atuam sobre o movimento das partículas de óleo submersas (Drivdal et al. 2014).

A Tabela 3 apresenta uma síntese dos compartimentos ambientais do óleo e de seus correspondentes processos de intemperismo.

*Tabela 3: Síntese dos compartimentos ambientais do óleo de acordo com balanços de massa e respectivos processos físico-químicos e biológicos responsáveis pelo intemperismo.*

BALANÇO DE MASSA E COMPARTIMENTOS AMBIENTAIS	CORRESPONDÊNCIA
Superfície	Espalhamento (Simecek-Beatty e Lehr 2017, Glug e Was, 2018).

	<p>Emulsificação (Mishra 2015, Zafirakou 2018, Daling et al. 2003, Ashrafizadeh 2012, Komaiko et al. 2015).</p>
	<p>Dispersão natural (Röhrs et al. 2018).</p>
	<p>Emersão (Johansen et al. 2015).</p>
	<p>Transporte (Li et al. 2013, Drivdal et al. 2014).</p>
<b>Evaporado</b>	<p>Evaporação (Mishra e Kumar 2015, Zafirakou 2018).</p>
	<p>Dissolução (ITOPF 2014, Mishra e Kumar 2015).</p>
<b>Coluna d'água</b>	<p>Mistura turbulenta (Tklich e Chan 2002, Johansen et al. 2015, Röhrs 2018).</p>
	<p>Transporte (Li et al. 2013, Drivdal et al. 2014).</p>
<b>Fundo marinho</b>	<p>Sedimentação (ITOPF 2014, Payne et al. 2003).</p>
	<p>Foto-oxidação (Spaulding 1988, ITOPF 2014, Zafirakou 2018, Ward e Overton 2010).</p>
<b>Degradado</b>	<p>Biodegradação (Das e Chandran 2011, Lawniczak et al. 2020, Bacosa et al. 2022, Kleindienst et al. 2015, Rahsepar et al. 2016).</p>
	<p>Espalhamento (Simecek-Beatty e Lehr 2017, Glug e Was, 2018).</p>
<b>Costa</b>	<p>Emulsificação (Mishra 2015, Zafirakou 2018, Daling et al. 2003, Ashrafizadeh 2012, Komaiko et al. 2015).</p>

	Dispersão natural (Röhrs et al. 2018).
	Transporte (Li et al. 2013, Drivdal et al. 2014).

# CAPÍTULO 3

## OBJETIVOS E RELEVÂNCIA

**“ O grande rio tem seu trajeto, antes do mar imenso. Copiando-lhe a expressão, a alma percorre igualmente caminhos variados e etapas diversas, também recebe afluentes de conhecimentos, aqui e ali, avoluma-se em expressão e purifica-se em qualidade, antes de encontrar o Oceano Eterno da Sabedoria. ”**

Espírito de André Luiz, psicografado por Chico Xavier  
Livro: “Nosso Lar”

### 3 OBJETIVOS E RELEVÂNCIA

Antes da apresentação dos objetivos e relevância da presente pesquisa, cabem algumas considerações que servirão para sua melhor fundamentação. A colocação em perspectiva do afundamento da plataforma Deepwater Horizon, o correspondente vazamento de óleo e a implantação da maior estrutura de resposta já colocada em ação na indústria petrolífera, em contraponto à hipótese da ocorrência de um acidente similar no Brasil servirá para justificar o desenvolvimento, objetivos e relevância da presente pesquisa.

Os impactos ambientais de um vazamento de óleo costumam ser considerados pelo senso comum apenas no que se refere ao volume de óleo vazado, à visualização de ambientes naturais como praias e manguezais atingidos pelo óleo, à fauna oleada e animais mortos, danos a comunidades pesqueiras, ao turismo interrompido e a uma série de outros aspectos que tem impactos visuais e imediatos mais perceptíveis.

No entanto, há um cenário por assim dizer “invisível” aos olhos leigos, que é a complexa questão da gestão dos resíduos gerados pelo vazamento. Quando se fala genericamente em gestão dos resíduos, na verdade o objeto em questão é um somatório de componentes contaminados, em geral distribuídos entre o volume de óleo recuperado, resíduos sólidos oleados compostos por EPI’s, material absorvente, lixo contaminado, detritos flutuantes, fauna intoxicada e morta, e água oleosa gerada pela descontaminação de embarcações envolvidas nas operações de resposta, dos diversos tipos de equipamentos empregados e aquela que é produzida por skimmers e current busters. Esse volume de material contaminado pode atingir desde pequenos montantes facilmente administráveis em instalações locais, como também pode atingir a volumes de proporções gigantescas, necessitando mobilizar recursos não apenas locais, mas também estaduais e federais.

De acordo com USEPA (2011), a geração de resíduos oriundos do vazamento da DWH foi composta por diferentes fluxos que incluiu água oleosa, bolas de alcatrão, vegetação e detritos oleosos, equipamentos de resposta contaminados por óleo como barreiras e mantas absorventes e EPI’s usados pelos trabalhadores envolvidos com as

operações de resposta, oscilando em valores estimados entre 251.460 toneladas (Wadsworth, 2014) e mais de 291 mil toneladas (Michel et al., 2015). Em função de seu grande volume, os resíduos foram distribuídos em instalações contratadas pela British Petroleum (BP) pelos Estados da Louisiana, Alabama, Mississippi, Flórida e Texas. Parte dos resíduos oleosos foram injetados em poços de controle de injeção subterrânea, enviados para reutilização ou eliminados em instalações de tratamento. Os resíduos sólidos foram encaminhados para aterros sanitários para descarte ou em escala menor, encaminhados para reciclagem.

Outros números superlativos das operações de resposta dão conta de que quase 1.300 km de barreiras fixas e 2.800 km de barreiras absorventes foram utilizadas (Macocho et al., 2019), 125 mil m<sup>3</sup> de água oleosa gerados, 19 mil m<sup>3</sup> de óleo recuperado, 265.000 barris queimados em 144 focos de queima controlada, 1.840.000 galões de dispersante lançados em superfície e diretamente na cabeça do poço (USCG, 2011; Macocha et al., 2019), 2063 skimmers usados no total (Macocho et al., 2019) dos quais foram usados simultaneamente 750 skimmers de diversos tipos (CEDRE, 2024a), quase 50 mil pessoas de 26 órgãos governamentais (USCG, 2011). Esses números dão conta da impressionante magnitude do acidente, de proporções inéditas se não com relação ao volume de óleo vazado, mas em relação à gigantesca infraestrutura de resposta mobilizada para acolhimento, tratamento e destinação final dos resíduos oleosos gerados.

### **3.1 OBJETIVOS**

Esse grandioso cenário mostra a realidade de que não há como desvincular o volume de óleo derramado dos seus respectivos resíduos gerados pelas operações de resposta ao acidente. Como dito acima, o senso comum só consegue vislumbrar o óleo, as praias, a fauna e os manguezais contaminados, mas um acidente de vazamento de óleo vai muito além disso. Mesmo depois de encerradas as operações de resposta, o acidente prossegue na medida em que os resíduos gerados precisam ser devidamente segregados, tratados e dispostos de forma segura. No entanto, a falta de percepção dos possíveis e eventualmente gigantescos volumes de resíduos gerados que podem ser

ainda maiores do que o próprio óleo vazado, pode contribuir para a mera definição da estrutura de resposta, perfeitamente suficiente para o recolhimento do óleo vazado, mas insuficiente para a gestão dos resíduos correspondentes. Ou seja, há uma lacuna a ser preenchida que permita uma prévia visualização e estimativa dos volumes de resíduos que podem ser gerados, de forma que o combate ao vazamento e a gestão dos resíduos possam andar de forma complementar e coordenada.

Diante dessa lacuna, o presente estudo propõe um sistema de modelagem baseado na Dinâmica de Sistemas, que diante de um caso concreto de derramamento de óleo, informe a expectativa de evolução diária dos volumes de resíduos oleosos gerados, e permita ao sistema de resposta uma adequação antecipada e progressiva às necessidades de acolhimento e destinação desses resíduos oleosos.

Ou seja, de forma sintética, o objetivo deste estudo é desenvolver um sistema de modelagem baseado em dinâmica de sistemas para estimar as massas expressas em toneladas de resíduos oleosos gerados pelas operações de resposta a um vazamento de petróleo em ambiente marinho.

### **3.2 RELEVÂNCIA**

A proposta de desenvolvimento de um sistema de modelagem que permita a estimativa dos volumes e tipologias de resíduos oleosos gerados pelas operações de resposta a vazamentos de óleo é de grande relevância na medida em que complementa as informações geradas pelos estudos de modelagem hidrodinâmica e dispersão de óleo apresentados ao IBAMA. Embora esses estudos sejam ferramentas de vital importância para a determinação das estruturas de resposta a vazamentos de óleo, limitam-se a avaliar o comportamento do óleo nos compartimentos ambientais<sup>5</sup>, sem entrar em considerações sobre os volumes de resíduos a serem gerados pelos procedimentos de remoção desse óleo do ambiente. As modelagens de derramamentos de óleo envolvem a simulação de trajetórias e comportamento do óleo com base em algoritmos

---

<sup>5</sup> Assoalho marinho, coluna d'água, superfície e costa.

matemáticos controlados por hidrodinâmica e força dos ventos. Uma vez que entre em contato com a água, o óleo derramado passa a sofrer as ações do intemperismo, que altera as propriedades físico-químicas do óleo derramado, e do transporte, que aumenta o tamanho da área atingida pelo óleo. Esses processos são afetados pelo volume de óleo derramado, o local onde ocorreu o derramamento do óleo e as características do óleo (Verma et al., 2008).

A modelagem numérica hidrodinâmica é utilizada na previsão do destino e o comportamento do óleo derramado, sendo um aspecto importante do planejamento de contingência de derramamento de óleo e do gerenciamento costeiro. Dentro desses aspectos, a estimativa da massa de óleo superficial, que é o foco do modelo de estimativa de resíduos oleosos ora apresentado, é uma das informações apresentadas pelos modelos hidrodinâmicos e de dispersão de óleo disponíveis para simular derramamentos de óleo em ambientes marinhos. Nas últimas décadas, diversos modelos numéricos foram desenvolvidos para simular derramamentos de óleo em ambientes marinhos, dentre os quais podemos citar:

- SIMAP - Spill Impact Model Application Package (French-McCay et al., 2021);
- OSCAR - Oil Spill Contingency and Response (Daling et al., 1997; Reed et al., 2004);
- OILMAP - Oil Spill Modeling Software (<http://www.asascience.com/software/oilmap/>);
- SIMAP - Integrated Oil Spill Impact Model System (<http://www.asascience.com/software/simap/>);
- GNOME - General NOAA Operational Modeling Environment (<https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/response-tools/gnome-suite-oil-spill-modeling.html>);
- MOHID - Water Modelling System (<http://www.webcitation.org/72P8XJ1SZ>);
- OpenDrift<sup>6</sup> - <https://opendrift.github.io/> (Dagestad et al., 2018; Röhrs et al. 2018).

---

<sup>6</sup> OpenDrift é um aplicativo de código aberto baseado em Python para modelagem de trajetórias e o destino de objetos ou substâncias à deriva no oceano. É desenvolvido no Instituto Meteorológico Norueguês com contribuições da comunidade científica em geral.

No entanto, nenhum desses modelos sequer se aproxima de algum tipo de estimativa da geração de resíduos oleosos gerados por ações de combate ao óleo derramado, o que caracteriza a lacuna dentro da qual se insere o modelo de geração de resíduos oleosos, o que reforça sua relevância.

Como já dito, os volumes de resíduos oleosos a serem gerados pelas operações de resposta podem chegar a montantes muitas vezes superiores ao volume do óleo vazado. Diante disso, de posse de estimativas de volumes de resíduos que podem ser gerados pelas operações de resposta, e da percepção da possibilidade de geração de grandes volumes de resíduos, os operadores podem melhor dimensionar não apenas a própria estrutura de resposta, mas também o sistema de gestão dos resíduos que passa a atuar de forma mais organizada no recebimento, tratamento e destinação final desses resíduos.

# CAPÍTULO 4

## METODOLOGIA

**“ Melhorar o mundo é melhorar os seres humanos. A compaixão é a compreensão da igualdade de todos os seres, é o que nos dá força interior. Se só pensarmos em nós mesmos, nossa mente fica restrita. Podemos nos tornar mais felizes e, da mesma forma, comunidades, países, um mundo melhor. A medicina já constatou que quem é mais feliz tem menos problemas de saúde. Quando cultivamos a compaixão, temos mais saúde. ”**

Dalai Lama (Tenzin Gyatso)  
Monge e Lama Tibetano – ☆ 1935

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 BASE DE DADOS PARA A MODELAGEM DOS VOLUMES DE RESÍDUOS OLEOSOS

A proposta do presente estudo é o desenvolvimento de um sistema de modelagem baseado em dinâmica de sistemas para estimar os volumes de resíduos oleosos gerados pelas operações de resposta a um vazamento de petróleo em ambiente marinho, conforme citado no item 3.1. A base de dados utilizada para a modelagem é um processo real de licenciamento ambiental em andamento no IBAMA, nº 02001.015057/2019-47 cuja interessada é a Enauta Energia S.A. (ENAUTA). O referido processo trata do Sistema Definitivo (SD) de Produção do Campo de Atlanta, na Bacia de Santos, situado a aproximadamente 120 km a sudeste da Cidade do Rio de Janeiro em águas ultra profundas, com profundidade próxima a 1.550 m. O desenvolvimento do SD de Atlanta foi dividido em duas fases distintas, consistindo na Fase 1 que compreende 3 (três) poços produtores oriundos do Sistema de Produção Antecipada (SPA) e na Fase 2, que compreende 1 (um) poço produtor no Cluster Sul e até 4 (quatro) poços produtores no Cluster Norte do Campo de Atlanta (ENAUTA, 2022).

O Sistema de Produção Antecipada (SPA) do Campo de Atlanta teve início em 02.05.2018, desde então operando com o FPSO Petrojarl I que retirou seu primeiro óleo do poço 7-ATL-2HP-RJS. Posteriormente, em 16.05.2018 foi colocado em produção o poço 7-ATL-3HP-RJS e por último em 21.06.2019 o terceiro poço, 7-ATL-4HB-RJS, iniciou sua produção.

Uma vez encerrada a etapa do SPA do Campo de Atlanta, e conseqüentemente definida a melhor configuração para o sistema de coleta de produção sendo assim reduzidos os riscos de implantação do SD, o FPSO Petrojarl I será substituído pelo FPSO Atlanta, capaz de produzir até 50 mil barris de óleo por dia e armazenar até 1.600.000<sup>7</sup> barris de óleo, com entrada em produção prevista para meados de 2024 (ENAUTA, sd).

Os dados de modelagem hidrodinâmica e de dispersão de óleo utilizados como base para o modelo foram extraídos do documento “Relatório Técnico [em. 00]

---

<sup>7</sup> 1.600.000 barris, referência a 253.438 m<sup>3</sup> no cenário de pior caso (ENAUTA, 2022).

Modelagem Hidrodinâmica e Dispersão de Óleo – Campo de Atlanta – Bacia de Santos” (ENAUTA, 2022, páginas 1203 a 1325). Dos 3 volumes de vazamentos acidentais modelados, de 8 m<sup>3</sup> (pequeno volume), de 200 m<sup>3</sup> (médio porte) e de pior caso no volume de 253.438 m<sup>3</sup> conforme preconizado pela Resolução CONAMA 398/2008 (CONAMA, 2008), foi adotado para a modelagem de geração de resíduos o volume de pior caso, correspondente ao volume esperado de vazamento em caso de afundamento do FPSO Atlanta.

A Modelagem Hidrodinâmica e Dispersão de Óleo considerou o cenário de pior caso com vazamento de 253.438 m<sup>3</sup> de óleo em superfície ao longo de 1 dia (24 horas) e simulou a deriva da mancha de óleo por mais 30 dias, totalizando 31 dias, correspondentes a 744 horas de simulação (ENAUTA, 2022).

A Tabela 4 apresenta os percentuais e respectivos volumes de óleo em superfície referentes ao volume total vazado de 253.438 m<sup>3</sup>, dispersos ao longo dos 31 dias da Modelagem Hidrodinâmica e Dispersão de Óleo. Tais volumes de óleo em superfície foram utilizados para alimentar o modelo de geração de resíduos no cálculo dos volumes de óleo recuperado, água oleosa e resíduos sólidos oleosos.

*Tabela 4: Percentual e volume de óleo (m<sup>3</sup>) em superfície ao longo dos 31 dias de simulação em relação ao volume total vazado (ENAUTA,2022).*

DIA	%	VOLUME	DIA	%	VOLUME	DIA	%	VOLUME
0	99,00	250.903,62	11	59,00	149.528,42	22	47,00	119.115,86
1	84,00	212.887,92	12	59,50	150.795,61	23	38,00	96.306,44
2	77,00	195.147,26	13	55,00	139.390,90	24	41,00	103.909,58
3	77,50	196.414,45	14	59,00	149.528,42	25	27,00	68.428,26
4	59,00	149.528,42	15	63,00	159.665,94	26	37,00	93.772,06
5	64,00	162.200,32	16	59,00	149.528,42	27	41,00	103.909,58
6	72,00	182.475,36	17	54,00	136.856,52	28	34,00	86.168,92
7	67,50	171.070,65	18	60,00	152.062,80	29	26,00	65.893,88
8	65,00	164.734,70	19	60,00	152.062,80	30	24,50	62.092,31
9	60,00	152.062,80	20	56,00	141.925,28	-	-	-
10	60,00	152.062,80	21	46,00	116.581,48	-	-	-

Um dos parâmetros mais importantes a alimentar o modelo de geração de resíduos é a densidade do óleo baseado em seu respectivo °API, uma vez que o modelo

de geração de resíduos apresenta como saída de dados as massas geradas de resíduos calculados em toneladas, em vez de seu volume em m<sup>3</sup>. Para tal, o modelo converte os 13,7 °API do óleo informado (ENAUTA, 2022) para sua respectiva densidade em ton/m<sup>3</sup>, mediante a Equação 1, embutida no modelo:

$$Densidade = \frac{141,5}{^{\circ}API + 131,5}$$

*Equação 1: Cálculo da densidade do óleo, a partir de seu grau API.*

As características do óleo utilizado nas simulações de geração de resíduos são apresentadas na Tabela 5.

*Tabela 5: Características do óleo utilizado nas simulações (adaptado de ENAUTA, 2022).*

PROPRIEDADE	VALOR	UNIDADE
Densidade	0,975 (a 15,6 °C)	ton/m <sup>3</sup>
°API	13,7	°

#### 4.2 ESTRUTURA ORGANIZACIONAL DE RESPOSTA (EOR)

A EOR de um empreendimento da natureza do Sistema Definitivo de Produção do Campo de Atlanta deve necessariamente seguir as orientações da Resolução CONAMA nº 398, de 11 de junho de 2008. Nesse escopo são definidas as atribuições e responsabilidades dos membros da EOR, definidos os recursos materiais próprios e de terceiros para a execução de ações de resposta e são definidos os procedimentos de gestão e resposta a emergências.

Para efeito do modelo de geração de resíduos oleosos apresentado na presente Tese, dentre a complexidade da EOR do estudo de caso em questão, o Sistema Definitivo de Produção do Campo de Atlanta, as informações de interesse ao modelo de geração de resíduos são referentes aos equipamentos e embarcações envolvidos nas eventuais atividades de combate a vazamentos de óleo fora dos limites da Unidade Marítima, no caso, o FPSO Atlanta, e nas embarcações de apoio às atividades de produção.

#### 4.2.1 EMBARCAÇÕES DE APOIO E RESPOSTA

Nesse aspecto, o Sistema Definitivo do Campo de Atlanta terá à sua disposição uma embarcação de apoio do tipo *Anchor Handling Tug Supply Vessel* (AHTS)<sup>8</sup> e uma embarcação do tipo *Platform Supply Vessel* (PSV)<sup>9</sup>, equipadas com recursos para atendimento a emergências de vazamentos de óleo no mar. Além do apoio às atividades do FPSO Atlanta e da prontidão em caso de emergência, ambas as embarcações são responsáveis pela logística de transporte de suprimentos entre as Bases de Apoio e o FPSO Atlanta. Em todos os momentos, ao menos uma das duas embarcações deverá estar posicionada a no máximo 2 horas do FPSO Atlanta. Além das embarcações AHTS e PSV, uma terceira embarcação, do tipo *Line Handler* (LH)<sup>10</sup>, é responsável pelo apoio às operações de *offloading* do FPSO Atlanta para um navio aliviador (ENAUTA, 2022).

Durante o período do Sistema de Produção Antecipada (SPA) do Campo de Atlanta foram utilizadas as embarcações de apoio listadas na Tabela 6. Dentre as embarcações utilizadas, foram selecionadas na alimentação do modelo de geração de resíduos dados referentes às embarcações AHTS Turmalina e PSV CBO Anita, cujos parâmetros utilizados no modelo são apresentados na Tabela 7.

Tabela 6: Embarcações de apoio atuantes nas atividades do Sistema de Produção Antecipada do campo de Atlanta (Adaptado de Enauta, 2022 – Quadro II.7.3-3).

EMBARCAÇÃO	TIPO	ANOS DE ATIVIDADE
AHTS Turmalina	AHTS	2018, 2019 e 2020
AHTS Geonísio Barroso	AHTS	2018
AHTS Normand Master	AHTS	2018
AHTS Normand Pioneer	AHTS	2019 e 2020
AHTS Far Sagaris	AHTS	2019
PSV CBO Anita	PSV	2019 e 2020

<sup>8</sup> Anchor Handling Tug Supply (AHTS) são embarcações com função precípua de manuseio de âncoras para fundeio de plataformas de petróleo, mas também são largamente utilizadas como embarcações de resposta a emergências e transporte de suprimentos.

<sup>9</sup> Platform Supply Vessel (PSV) são embarcações de apoio offshore utilizadas no transporte de suprimentos, ferramentas, equipamentos e materiais diversos para as plataformas de petróleo offshore de óleo e gás, podendo atuar em função de seu porte e grande tancagem, em operações de combate e limpeza em derramamentos de óleo.

<sup>10</sup> Line Handler (LH) são embarcações que atuam no apoio ao descarregamento do petróleo desde FPSO's ou FSO's para os navios-tanque e na manutenção dos mangotes flexíveis flutuantes. Podem ainda auxiliar os navios-tanque durante o carregamento nos sistemas de atracação.

Tabela 7: Embarcações de atendimento a emergências de vazamentos de óleo no mar e respectivos parâmetros utilizados no modelo.

PARÂMETROS	PSV CBO ANITA	FONTE	AHTS TURMALINA	FONTE
<b>Volume do tanque (m<sup>3</sup>)</b>	1.088,50	ENAUTA 2021, Apêndice H	1.050,00	ENAUTA 2021, Apêndice H
<b>Tripulação</b>	27	Apêndice 5	30	<a href="https://www.solstad.com/vessel/normand-turmalina/">https://www.solstad.com/vessel/normand-turmalina/</a> .
<b>Comprimento do costado (m)</b>	75,20 (comprimento) x 2 + 17,00 (largura) = 167,40	<a href="https://www.marinetraffic.com/em/ais/details/ships/shipid:774946/mmsi:710004550/imo:9477402/vessel:CB_O_ANITA">https://www.marinetraffic.com/em/ais/details/ships/shipid:774946/mmsi:710004550/imo:9477402/vessel:CB_O_ANITA</a>	80,50 (comprimento) x 2 + 18,05 (largura) = 179,05	<a href="https://www.marinetraffic.com/em/ais/details/ships/shipid:1037177/mmsi:710002430/imo:9329954/vessel:NORMAND_TURMALINA">https://www.marinetraffic.com/em/ais/details/ships/shipid:1037177/mmsi:710002430/imo:9329954/vessel:NORMAND_TURMALINA</a>

#### 4.2.2 EQUIPAMENTOS DE RESPOSTA

Os equipamentos de resposta para atendimento ao SD do Campo de Atlanta ficam disponibilizados para uso imediato nas embarcações Anchor Handling Tug Supply Vessel (AHTS) e Platform Supply Vessel (PSV), e nas Bases de Apoio Logístico situadas na Baía de Guanabara (Rio de Janeiro/RJ e Niterói/RJ) e no Porto do Açú, em São João da Barra/RJ. Estas bases localizam-se respectivamente a cerca de 175 km (95 MN) e de 265 km (145 MN) do Campo de Atlanta.

##### 4.2.2.1 DIMENSIONAMENTO DA CAPACIDADE DE RESPOSTA

A capacidade de resposta dimensionada para incidentes de vazamento de óleo fora dos limites da Unidade de Produção (FPSO) no Campo de Atlanta foi determinada com base no Anexo III da Resolução CONAMA n° 398/2008 (CONAMA, 2008) que define os critérios para o dimensionamento da capacidade mínima de resposta e na Nota Técnica CGEPG/DILIC/IBAMA n° 03/2013 (IBAMA, 2013) que define as diretrizes para aprovação dos Planos de Emergência Individuais (PEI) nos processos de licenciamento ambiental dos empreendimentos marítimos de exploração e produção de petróleo e gás natural.

Nesses termos, o dimensionamento dos recursos disponíveis para as ações de contenção e recolhimento de óleo em superfície foram definidos pela ENAUTA conforme apresentado na Tabela 8. Em casos extremos, diante da ocorrência de incidentes de grande magnitude e complexidade, recursos adicionais da Oil Spill Response Limited (OSRL)<sup>11</sup> poderão ser requisitados (ENAUTA, 2021), como é de praxe entre as operadoras de óleo e gás.

*Tabela 8: Recursos disponíveis para ações de contenção e recolhimento de óleo no mar no Sistema Definitivo (SD) do campo de Atlanta (ENAUTA, 2021).*

LOCALIZAÇÃO	TIPO DE EQUIPAMENTO	QUANTIDADE	CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO TEMPORÁRIO
<b>Anchor Handling Tug Supply Vessel (AHTS)</b>	Current Buster 6 ou similar com bomba de recolhimento de 200 m <sup>3</sup> /h	1	Mínimo de 600 m <sup>3</sup>
	Paravana	1	
	Componente flutuante (barreira) do Current Buster 6 ou similar	1	
<b>Platform Supply Vessel (PSV)</b>	Current Buster 6 ou similar com bomba de recolhimento de 200 m <sup>3</sup> /h	1	Mínimo de 600 m <sup>3</sup>
	Paravana	1	
	Componente flutuante (barreira) do Current Buster 6 ou similar	1	
<b>Base de atendimento a emergência</b>	Recolhedor tipo vertedouro com capacidade de recolhimento de 350 m <sup>3</sup> /h	2	N/A

<sup>11</sup> A Oil Spill Response Limited (OSRL) é uma organização global especializada em resposta a derramamentos de petróleo, financiada por membros que incluem empresas de petróleo, gás e outras partes interessadas na gestão de emergências ambientais. Seu objetivo principal é fornecer suporte técnico, logístico e estratégico para mitigar os impactos ambientais e operacionais causados por derramamentos de óleo no mar e em terra.

	Barreiras de contenção tipo oceânica	800 m	
	Barreiras absorventes	2.000 m	
	Sopradores de ar	4	

Como podemos observar, os equipamentos de resposta listados na Tabela 8 não incluem mantas absorventes comumente utilizadas em locais inacessíveis aos recolhedores (skimmers), em ações de limpeza final e na proteção do litoral, como previsto no Anexo III, item 2.6 da Resolução CONAMA 2008. Tendo em vista essa condição da Resolução CONAMA 2008, o modelo de geração de resíduos ora proposto inclui em seus componentes de geração de resíduos e coleta de óleo as mantas absorventes, em função de tratar-se de um modelo de uso geral, a ser alimentado de acordo com as características específicas de cada estrutura de resposta. Apesar dessa disponibilidade, no caso específico da modelagem utilizando os recursos de resposta listados na Tabela 8, as quantidades de mantas absorventes serão ajustadas em 0 (zero).

As capacidades de recolhimento, taxas de eficiência e capacidade nominal dos equipamentos de recolhimento de óleo são apresentados na Tabela 9. Tais valores foram inseridos no modelo de geração de resíduos.

Tabela 9: Capacidade de recolhimento de óleo de skimmers e current busters (ENAUTA, 2021).

EQUIPAMENTO	CAPACIDADE NOMINAL (m <sup>3</sup> /h)	TAXA DE EFICIÊNCIA (%)	CAPACIDADE DE RECOLHIMENTO (m <sup>3</sup> /h)
Vertedouro (skimmer)	350	20	70
Current Buster	200	70	140

### 4.3 DINÂMICA DE SISTEMAS

#### 4.3.1 SISTEMAS E MODELOS

O termo “sistema” é um dos conceitos mais largamente utilizados nas investigações científicas. Diversos tipos de sistemas são familiares a todos em nossa experiência cotidiana. Sistemas mecânicos como relógios, sistemas elétricos como

rádios, sistemas industriais como fábricas, sistemas educacionais como Universidades, sistemas de informação como computadores, sistemas médicos como hospitais, além de muitos outros, como sistemas organizacionais, ambientais e cibernéticos. Trata-se, portanto, de um conceito de ampla aplicação (Vemuri, 1978).

Um sistema é uma parte restrita da realidade que contém elementos inter-relacionados, cuja totalidade das relações é conhecida como “estrutura do sistema”. Tanto os sistemas quanto os modelos têm uma estrutura, de forma que um modelo é uma representação simplificada de um sistema. Por sua vez, simulação é a construção de modelos matemáticos e o estudo de seu comportamento em comparação ao comportamento dos sistemas de origem (Leffelaar, 1993). Um sistema é um conjunto de componentes interligados que atuam de forma simultânea com o objetivo de atingir um resultado específico. Em termos matemáticos, cada componente é uma variável do sistema, a qual pode assumir valores reais ou complexos. A palavra “sistema” pode referir-se a entidades tão variadas quanto a sistemas biológicos, um ecossistema natural, uma empresa, uma cidade, uma plataforma de petróleo, o mercado de capitais, dentre tantos outros. O que torna similares elementos tão distintos é sua constituição interna, formada por partes interligadas e interdependentes cada uma da qual essencial para a execução dos objetivos daquele sistema. Os sistemas podem diferir uns dos outros não por causa de diferenças em suas partes, mas por causa de diferenças em como essas partes dependem e afetam umas às outras (Siegenfeld e Bar-Yam, 2020).

A simulação de sistemas fornece o método necessário a partir do estudo de seu comportamento, apresentando a correlação de todos os fatores envolvidos e sua interferência, gerando a possibilidade de fazer previsões sobre o sistema ou processo simulado. Nesse aspecto, o termo "simulação" está associado à evolução temporal de um sistema a partir de informações de entrada aplicadas, a fim de identificar as correspondentes resposta de saída desse sistema (Coculescu, 2013).

Modelos são a representação abstrata de um sistema existente no mundo real, podendo ser descritivos ou prescritivos. Bertalanffy, considerado como o fundador da Teoria Geral dos Sistemas, define sistema como “uma entidade que mantém sua

existência através da mútua interação de suas partes” (Bertalanffy, 1968). O objetivo de um modelo pode ser permitir a explicação, antecipação ou design de um sistema real. O termo “sistema” é usado para enfatizar o caráter interrelacional das variáveis de um modelo, servindo para identificá-lo como um todo organizado de variáveis e relações (Schwaninger e Groesser, 2018).

Os conceitos de sistema e modelo são indissolúveis, na medida em que um modelo nada mais é do que é uma representação de um sistema real (Garbolino et al., 2016).

Ao se modelar um sistema, um objetivo geral pode ser a identificação da situação do sistema em um determinado momento e a variação de seu comportamento em função do tempo. Quando a mudança do sistema ao longo do tempo é um componente incluído, a simulação é chamada de simulação dinâmica (Leffelaar, 1993).

O processo de modelagem foca em uma parte selecionada da realidade que precisa ser compreendida por meio de uma representação externa e explícita na forma de um modelo, uma síntese dessa realidade. Essa realidade pode ser uma organização que enfrenta o declínio da participação de mercado, uma agência de saúde pública e sua atuação perante um surto de uma doença infecciosa, governos desafiados pelo aumento dos níveis de carbono na atmosfera, ou qualquer outro cenário sociotécnico com o qual os tomadores de decisão se deparam. Os modelos fornecem uma base para os tomadores de decisão entenderem seu mundo como um sistema interconectado e testarem o impacto das intervenções (Duggan, 2016).

Um aspecto importante é a questão de como os modelos dinâmicos devem ser validados, o que tem sido uma questão controversa por muitos anos. Barlas e Carpenter (1990) citam diversos artigos<sup>12</sup> que debatem o assunto, escritos ao longo de quase uma década e meia. Essa controvérsia tornou-se mais crucial à medida que novas e complexas ferramentas de modelagem surgiram desde a segunda metade do século passado. A metodologia de dinâmica de sistemas constitui uma dessas ferramentas e,

---

<sup>12</sup> Ansoff e Slevin (1968); Forrester (1968); Nordhaus (1973); Forrester et al. (1974); Forrester e Senge (1980); Forrester (1980); Zellner (1980); Richardson e Pugh (1981).

não surpreendentemente, as práticas de validação de modelos de dinâmica de sistemas têm sido objeto de um exame bastante acalorado.

Ainda de acordo com Barlas e Carpenter (1990), a dinâmica de sistemas não emprega procedimentos formais, objetivos e quantitativos de validação de modelos, que em tese deveriam ser fundamentais para a investigação científica. A implicação dessa visão é que os modelos de dinâmica de sistemas não seriam "formalmente científicos", de tal forma que a validade do modelo está mais fortemente ligada à natureza e ao contexto do problema, ao propósito do modelo, ao histórico do usuário, ao histórico do analista. Por consequência, a validação do modelo é inerentemente um processo social, de julgamento pessoal e qualitativo. Portanto, a validade do modelo não pode ser provada, mas apenas julgada de forma subjetiva. É importante entender que do ponto de vista da dinâmica de sistemas, nem a estrutura do modelo, nem seus limites e mesmo as variáveis são elementos necessariamente "objetivos", mas sim os resultados de um processo de troca de opiniões entre as partes interessadas. Segundo os autores, o conceito de "validação" em si tem significados diferentes, dependendo das posições filosóficas. Se alguém adota uma filosofia empírica e lógica de validação de modelos, então a validação é vista como um processo estritamente formal, algorítmico e reducionista. Como o modelo é assumido como uma representação objetiva e absoluta do sistema real, ele pode ser verdadeiro ou falso. Uma vez que o analista use os algoritmos de validação adequados, uma vez que o modelo confronte os fatos empíricos, sua verdade ou falsidade é automaticamente revelada. Um modelo válido é assumido como uma das maneiras possíveis de descrever uma situação real, de tal forma que os modelos não são verdadeiros ou falsos em absoluto, mas estão em um "continuum" de utilidade. Os autores prosseguem ainda enfatizando que a validação do modelo é um processo de construção de confiança no modelo, que é alcançado por meio de conversas sociais para estabelecer a sua utilidade.

Em termos mais atuais, Derwisch e Löwe (2015) tem uma visão que se enquadra na visão clássica de Barlas e Carpenter (1990), na medida em que afirmam que a questão da validação dos modelos dinâmicos implica em quão "objetivo" e "empiricamente robusto" ele é.

A simplicidade de um modelo é o princípio fundamental do que é a modelagem. A principal razão pela qual são construídos modelos é o interesse em uma descrição mais objetiva e simples da realidade. A validade de um modelo é o quão perto as previsões do modelo concordam com a realidade observada. Se a previsão do modelo não corresponder razoavelmente à observação, o modelo não representará razoavelmente a realidade. Tão importante quanto a validade das previsões do modelo, é a validade das premissas adotadas em sua construção, ou seja, se cada suposição usada no modelo faz sentido em seu valor nominal, tendo em vista o conhecimento existente, bem como o senso comum. A "validade aparente" é mais importante na modelagem de sistemas dinâmicos, por conta das muitas situações em que simplesmente não é possível realizar uma comparação quantitativa entre a previsão do modelo e os dados observacionais. Sendo esse o caso, é importante que seja verificada a validade aparente das suposições do modelo com base na compreensão sobre o sistema ou fenômenos modelados (Sayama, 2015).

A dinâmica de sistemas envolve o estudo, modelagem e simulação de fenômenos que criam uma mudança ou a manutenção do estado de um sistema natural ou artificial ao longo do tempo (Garbolino et al., 2016).

#### **4.3.1.1 SISTEMAS COMPLEXOS**

A compreensão do conceito de "sistemas complexos" deve passar preliminarmente pela análise etimológica da palavra "complexo". A origem dessa palavra tem como raiz a palavra latina "plexus" (entrelaçamento, conexão, aderência), da qual tem origem a palavra "complexus". Seu antônimo não é "simplex" (simples), mas "implexus" cujo significado é "irreduzível".

Assim sendo, no contexto da Dinâmica de Sistemas, o adjetivo "complexo" não deve ser encarado como sinônimo de "complicado". O que define um sistema complexo como tal é a existência interna de inúmeras unidades menores, cujo comportamento e compreensão podem ser muito simples, mas que se apresentam sob a forma de uma

intrincada rede de conexões, a qual, como um todo, é a responsável por seu comportamento global.

Vemuri (1978), destaca uma interessante característica dos sistemas complexos. Segundo a autora, sistemas complexos evoluem com o tempo, em função de suas características de “sistema aberto”, que se mantém em constante interação com o ambiente a seu redor. Essa característica permitiria ao sistema agregar novos valores ao longo do tempo, caracterizando o chamado “aprendizado” do sistema.

O conceito de sistemas complexos tem recebido diversas definições a partir de diversas disciplinas tais como biologia, física, engenharia, matemática, ciência da computação, etc. Uma definição consistente a partir da literatura para quase todas aquelas disciplinas é que um sistema é um conjunto de peças interligadas, formando um “todo” integrado, e o adjetivo "complexo" implica que um sistema tem propriedades que não são facilmente compreensíveis a partir das propriedades de suas partes (Golden et al. 2012).

Segundo Sussman (2002), um sistema é complexo quando ele é composto de um conjunto de subsistemas cujos grau e natureza das relações é pouco conhecido. Seu comportamento global é difícil de prever, mesmo quando o comportamento do subsistema é facilmente previsível. Seu comportamento a longo e curto prazo pode ser muito diferente e pequenas mudanças em entradas ou parâmetros podem produzir grandes mudanças no comportamento.

O estudo de sistemas complexos distingue-se por ser uma disciplina que tem aplicações em muitas áreas distintas do conhecimento científico. O estudo de Redes Neurais, padrões de tráfego, Inteligência Artificial, Sistemas Sociais, e muitas outras áreas científicas podem ser consideradas no âmbito de sistemas complexos, e podem ser estudadas a partir desta perspectiva (Smith 2002). Segundo o autor, o site do “New England Complex Systems Institute” (NECSI) descreve um sistema complexo como "vários componentes que interagem cujo comportamento coletivo não pode simplesmente ser inferido a partir do comportamento dos componentes". O

reconhecimento de que a compreensão das partes não pode explicar o comportamento coletivo levou a vários novos conceitos e metodologias que afetam todos os campos da ciência e da engenharia, sendo aplicados em tecnologia, negócios e até mesmo política social.

#### **4.3.2 FUNDAMENTOS DA DINÂMICA DE SISTEMAS**

A abordagem da Dinâmica de Sistemas foi desenvolvida no final dos anos cinquenta e início dos anos sessenta no âmbito da Sloan School of Management do Massachusetts Institute of Technology (MIT), por Jay Wright Forrester (Forrester 1958; Forrester 1995; Forrester 1961; Forrester 2007; Lane 2007) e foi consolidada em sua obra “Industrial Dynamics”, publicada em 1961, para estudar as relações e influências existentes entre os elementos de um sistema, seja ele uma corporação, um ecossistema natural, uma planta industrial, uma plataforma de petróleo ou um organismo vivo, por exemplo. Utiliza como ferramentas a modelagem, por meio da qual procura reproduzir a estrutura das relações de causa e efeito entre os elementos de um sistema, e a simulação, que analisa a forma como se comportam essas estruturas ao longo do tempo (Forrester 1961, Musse 2010). Seu maior benefício é permitir avaliar as melhores opções para alcançar os resultados desejados e evitar os indesejados por meio da manipulação de cada parte, avaliando sua influência sobre a estrutura. Como efeito, é possível testar decisões, avaliar seus resultados e corrigir antecipadamente os rumos necessários para alcançar os resultados esperados.

Na origem do desenvolvimento da Dinâmica de Sistemas a elaboração de modelos foi baseada nos simples conceitos de Estoques, Fluxos, Conversores e Conectores (Zuckerman 2004). A dificuldade então vigente de escrever programas computacionais onde estivessem presentes um elevado número de equações gerou a necessidade de uma simplificação das equações utilizadas na modelagem, a fim de facilitar a visualização daquilo que estava sendo modelado. Esse conceito deu origem àquilo que é até hoje conhecido como “A Linguagem dos Fluxos e dos Estoques”. A compreensão dos conceitos de estoques e fluxos é essencial para a construção dos diagramas de fluxos (Forrester 1998).

O foco inicial da abordagem de Forrester tinha como objetivo a análise de problemas dinâmicos da administração industrial, como problemas de gerenciamento, problemas de flutuação de inventário, queda das ações de uma empresa e a instabilidade da força de trabalho (Forrester 1961). Entretanto, o campo de aplicação da abordagem ampliou-se, passando a ser aplicada na modelagem de sistemas complexos em diversos campos de estudo, os quais incluem sistemas urbanos, econômicos e ecológicos (Kasper 2000), bem como gestão empresarial, ciclos de negócios, economia, além de fenômenos sociais como criminalidade e propagação de doenças, dentre muitos outros (Fernandes 2003).

A dinâmica de sistemas envolve o estudo, modelagem e simulação de fenômenos que criam uma mudança ou a manutenção do estado de um sistema natural ou artificial ao longo do tempo (Garbolino et al., 2016).

A modelagem dinâmica de sistemas é uma ferramenta matemática de alto valor que tem sido utilizada em diversas áreas do conhecimento em áreas tão distintas como planejamento energético (Moumouni et al. 2014), transição para baixa intensidade de carbono (Epe Shari et al. 2020), produção de biogás (Momodu et al. 2020), sistemas de transporte (Mupfumira e Wirjodirdjo 2015), telecomunicações (Zhihong et al. 2014), políticas e estratégias de marketing (Hajiheydari et al. 2014), sistemas de aposentadoria (Ming-Feng et al. 2022), processos hidrológicos (Ouyang et al. 2013), saúde pública (Sharif et al. 2022), mobilidade urbana (Rodriguez Lara et al. 2023), neurologia (Payne-Sturges et al. 2023), turismo (Luo 2022), resíduos de construção civil (Ahmed et al. 2023), pegada de carbono (Anggoro et al. 2023), economia (Cavana et al., 2021).

#### **4.3.2.1 SISTEMAS ABERTOS E FECHADOS**

De acordo com Forrester (1973), existem duas categorias de sistemas: sistemas “fechados” e sistemas “abertos”. Em termos de Dinâmica de Sistemas, um sistema “fechado” é um sistema que sofre alterações em suas ações com base nos resultados de ações anteriores, o que significa que os sistemas fechados sofrem modificações em seu próprio comportamento ao longo do tempo em função das causas que criam as

mudanças de comportamento, por estarem dentro do próprio sistema. O desempenho de sistemas “abertos”, por outro lado, não é influenciado por seu próprio desempenho passado, mas por eventos externos que surgem ao longo do tempo. Embora a Dinâmica de Sistemas tenha sido desenvolvida principalmente para sistemas que podem ser considerados “fechados”, é frequentemente usada para lidar com questões do mundo real que são puramente “abertas” ou não são totalmente fechadas nem totalmente abertas (Pruyt, 2013).

Em sistemas “fechados”, o sistema sofre a influência de seu próprio comportamento passado, de tal forma que causa e efeito se confundem. Tais sistemas são ditos “dinâmicos” por conta da influência que o evento passado tem sobre o evento futuro. Quando duas ou mais variáveis constituem um circuito fechado de relações, influenciando-se mutuamente em uma relação causa-efeito-causa sem identificação clara sobre sua origem, surgem os “loops de feedback” responsáveis pelos mecanismos de reforço ou equilíbrio que determinam o comportamento crescente, oscilatório, decrescente ou estagnado de um sistema (Figura 6).

Em sistemas “abertos”, embora haja uma relação direta entre causa e efeito, o efeito não realimenta a causa, de forma que inexistente o “loop de feedback” (Figura 7).

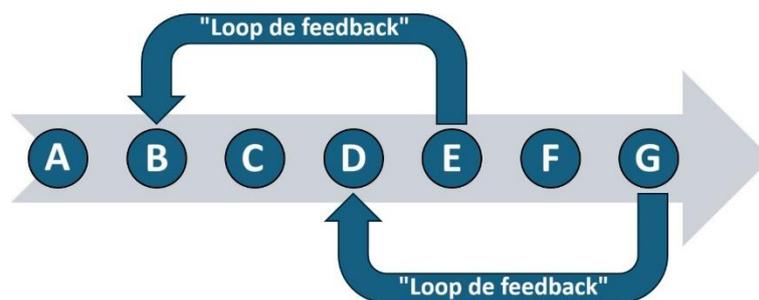


Figura 6: Sistema "fechado" na ótica da Dinâmica de Sistemas.

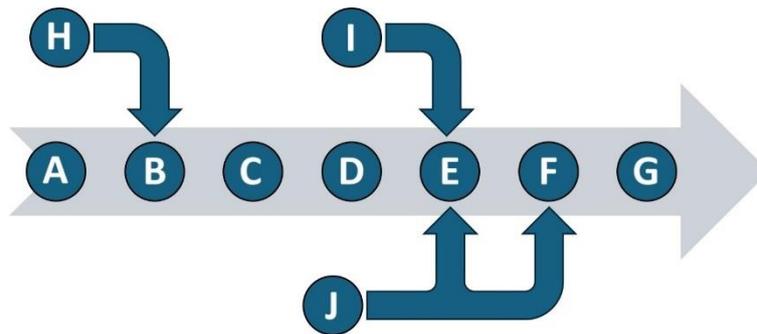


Figura 7: Sistema "aberto" na ótica da Dinâmica de Sistemas.

O modelo apresentado nesta pesquisa é um exemplo de “sistema aberto”, onde cada evento atua nos eventos seguintes sem realimentação, como pode ser visto nas Figuras 12 a 24, que apresentam o modelo de forma segmentada e em detalhes.

#### 4.3.3 TIPOS DE MODELAGEM EM DINÂMICA DE SISTEMAS

A Dinâmica de Sistemas pode ser empregada como método qualitativo ou descritivo (modelagem “soft”) e quantitativo ou preditivo (modelagem “hard”) para exploração e análise de sistemas (Kunc, 2007).

A modelagem qualitativa é empregada para descrever um sistema e seus componentes a partir de dados obtidos de entrevistas e teorias, a fim de obter uma compreensão ampla do funcionamento e dos componentes do sistema modelado. Em modelos quantitativos a complexidade dinâmica origina-se dos processos de acumulação (estoques) e drenagem (fluxos), e não dos ciclos de “feedback” (Figura 2), como nos modelos qualitativos. Uma vez que estoques e fluxos são identificados, dados adicionais (variáveis e constantes) são necessários para calcular as mudanças da estrutura do presente para o futuro considerando todos os processos existentes no sistema modelado (Kunc e Morecroft 2007).

A modelagem “soft” pode ser usada como uma ferramenta de metamodelagem, uma forma simplificada do modelo, onde o uso do Causal Loop Diagram CLD (Figura 8), ou Diagrama de Enlace Causal, em português, ajuda o modelador a entender o sistema. Em seguida, o modelador usa qualquer método quantitativo, por exemplo, análise

estatística, programação linear, simulação de eventos discretos, dinâmica de sistemas, para melhorar o desempenho do sistema (Kunc, 2007).

#### **4.3.3.1 MODELAGEM “SOFT”**

Este tipo de modelagem permite a visualização dos sistemas por meio da identificação de suas características, indicando as relações de causa e efeito. Utiliza a técnica dos Diagramas de Enlace Causal, os quais permitem a compreensão do comportamento do sistema em função da simplicidade de seus elementos e da forma como a interação entre eles é representada de forma estruturada (Andrade, 1997).

A modelagem “soft” baseia-se na forma como percebemos nosso ambiente de estudo. Nossas crenças e hipóteses sobre o funcionamento do sistema definem a nossa visão sobre a estrutura do sistema e as relações entre suas partes.

Segundo Fernandes (2003), a modelagem “soft” permite a visualização de quaisquer sistemas por meio da identificação de sua estrutura, de suas relações de causa e efeito e das estruturas de “feedback” existentes. Para tal, são utilizados os diagramas de enlace causal, cuja natureza qualitativa permite a descrição dos principais elementos que dão origem a um sistema de “feedback”, conforme exemplificado na Figura 2.

O uso qualitativo da dinâmica de sistemas baseia-se na identificação dos loops de feedback para descrever um sistema dinamicamente complexo. Nesse caso, o uso de diagramas de enlace causal (CLD), sem modelagem quantitativa, é suficiente para fornecer insights para os tomadores de decisão (Kunc e Morecroft, 2009).



#### **4.3.4.1 ESTOQUES**

Os Estoques representam variáveis que podem ser diversas unidades físicas, tais como posição, velocidade, força, massa, trabalho, energia, dentre outras (Santos et al. 2000). São variáveis de estado que demonstram a situação do Sistema ao longo do tempo (Amega et al. 2021). Os estoques representam a acumulação dos resultados das ações do sistema, ou seja, são os valores atuais das variáveis, resultantes da diferença acumulada entre os fluxos de entrada e de saída (Forrester 2009).

Forrester (1998), considera que os estoques representam a acumulação dos resultados das ações do sistema, ou seja, são os valores atuais das variáveis, resultantes da diferença acumulada entre os fluxos de entrada e de saída.

Estoques são acúmulos de unidades, representados graficamente como retângulos (Figura 5), que só podem ser modificados por meio de suas entradas e saídas conectadas, os fluxos (Schoenenberger et al., 2021).

#### **4.3.4.2 FLUXOS**

Fluxos são variáveis de controle que representam as taxas de mudanças no estado de uma variável do tipo estoque ao longo do tempo. Por este motivo, fluxos sempre estão ligados a estoques que representam aquela variável. Os fluxos podem se relacionar com os estoques como fluxos de entrada ou de saída, fazendo com que os valores dos estoques cresçam ou diminuam (Amega et al. 2021). Seu sentido de atuação pode ocorrer tanto de forma unidirecional quanto bidirecional, representando então em relação aos estoques a eles conectados respectivamente fluxos de entrada ou saída e fluxos de entrada e saída. Fluxos podem representar unidades físicas como velocidade, aceleração, força, potência, dentre outras (Santos et al. 2000). As nuvens representadas no início e final de cada fluxo representam elementos de origem e destino final fora dos limites do sistema em análise, os quais não estão sendo considerados (Musse 2010).

Os fluxos podem representar entradas ou saídas em relação aos estoques, implicando em um movimento de unidades por tempo, visualmente representados por uma seta (Figura 5). São regulados por funções de decisão, visualizadas como válvulas nas entradas e saídas (Schoenenberger et al., 2021).

#### **4.3.4.3 ELEMENTOS AUXILIARES**

Além de Fluxos e Estoques, os blocos fundamentais dos Sistemas, elementos auxiliares são utilizados para formular os dados no intuito de definir as equações dos fluxos. Servem para combinar através de operações algébricas os fluxos, estoques e outros elementos auxiliares. São usados para modelar as informações, e não o fluxo físico, podendo ser alterados instantaneamente, sem atrasos (Simoneto e Lobler 2012). Bastos (2003) acrescenta que os elementos auxiliares além de serem os responsáveis pela realização das operações algébricas também representam fontes de informações externas ao sistema.

#### **4.3.4.4 CONVERSORES**

Os Conversores (Figura 5) podem ser utilizados tanto como valores constantes tanto como funções. Como funções, convertem os valores de uma variável de acordo com uma equação definida pelo usuário. Apresentam as taxas que modificam e emprestam valores para os fluxos e são representados por meio de círculos (Rehan et al. 2011, Mirchi et al. 2012). Conversores podem executar diferentes tarefas, tais como definir valores para constantes, definir entradas externas para o modelo, calcular relações algébricas entre valores, servir de repositório para funções gráficas (Amega et al. 2021).

#### **4.3.4.5 CONECTORES**

Os Conectores (Figura 5) servem para estabelecer uma relação entre dois componentes na construção do diagrama, representando a passagem de informações

entre as variáveis as quais formarão as expressões matemáticas utilizadas no modelo (Rehan et al. 2011, Mirchi et al. 2012, Amega et al. 2021).

#### **4.3.4.6 “FANTASMAS”**

Em modelos onde ocorre uma grande repetição de elementos como estoques, fluxos e conversores espalhados por várias partes do modelo, a conexão entre esses elementos por meio de conectores poderia gerar um padrão visual caótico, com o cruzamento de grande número de conectores se sobrepondo, “poluindo” o visual do modelo, como mostra a Figura 7. Para evitar essa confusão visual, pode ser utilizada a ferramenta “fantasma” (Figura 5), a fim de criar cópias numéricas de estoques, fluxos e conversores individuais, conectando variáveis entre módulos e setores distintos de um modelo. Um “fantasma” não é uma entidade independente, é simplesmente uma cópia do elemento original, reproduzindo o valor ou a equação desse elemento original. Os “fantasmas” aparecem no modelo com os mesmos nomes dos elementos de origem, com contornos pontilhados (Ruth e Lindholm, 2002).

#### **4.3.4.7 “DELAYS”**

Segundo Sannino (2006), “delays” ou atrasos são ao lado do conceito de “feedback” os responsáveis por grande parte dos sistemas complexos. Esses atrasos ocorrem quando os efeitos de uma variação em um dos elementos do sistema não ocorrem de forma imediata, causando efeitos indesejados, como oscilações ou amplificações (Epe Shari et al. 2020).

Para Sterman (2000), um conceito bastante interessante sobre os “delays” é sua tese de que em sua evolução, o homem aprendeu a perceber problemas cujos efeitos são imediatos, como sentir a pele queimar ao colocar a mão no fogo. Segundo o autor, a mente humana tem dificuldade de perceber uma relação causal quando causa e efeitos estão distantes no tempo. Os “delays” são representados por duas barras paralelas posicionadas ao longo do relacionamento no qual ocorre o atraso. A Figura 5 ilustra os Blocos de Construção na modelagem “hard”.

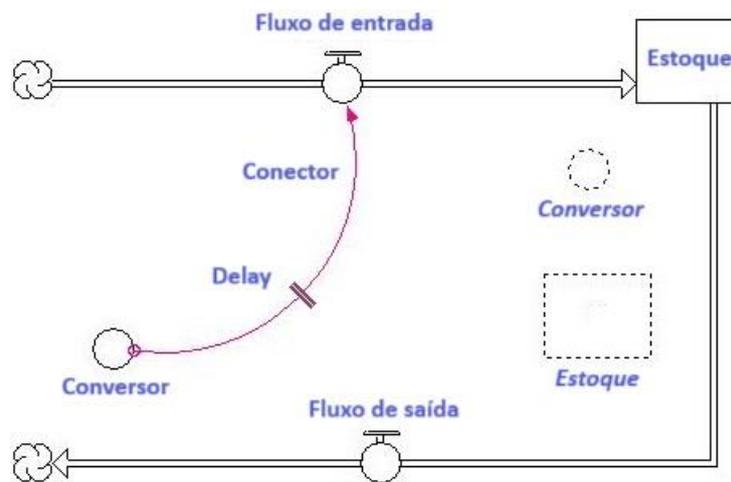


Figura 9: Blocos de construção na modelagem "hard".

#### 4.4 FERRAMENTA COMPUTACIONAL UTILIZADA

A construção de um Modelo Dinâmico de Sistemas tem a seu dispor uma série de ferramentas computacionais representada por uma grande variedade de programas para sua execução, cada qual com características e abordagens próprias. De acordo com o site da Sociedade de Dinâmica de Sistemas (System Dynamics Society, <http://www.systemdynamics.org/>), os três principais softwares comerciais atualmente disponíveis são os seguintes:

- STELLA/iThink (<http://www.iseesystems.com/>): iThink e STELLA são dois nomes para uma mesma plataforma de desenvolvimento de modelos, diferenciadas pelos objetivos da modelagem. Enquanto STELLA destina-se à educação e pesquisa, iThink destina-se à modelagem de políticas e negócios. O modelo apresentado neste trabalho foi desenvolvido no software STELLA;
- Powersim Studio (<http://www.powersim.com/>): Powersim Studio está disponível em diferentes configurações, disponíveis sob licenças comerciais e acadêmicas;
- Vensim (<http://vensim.com/>): Vensim está disponível sob licenças comerciais e gratuitas para fins educacionais, sendo neste caso disponibilizada uma versão com recursos limitados.

Além desses, diversos outros programas estão disponíveis, tanto em licenças comerciais como em licenças gratuitas e até mesmo “open-source”. Dentre esses, podem ser citados os seguintes:

- AnyLogic, produzido pela AnyLogic Company (<http://www.anylogic.com/>);
- Smia, produzido pela Dynaplan (<https://www.dynaplan.com/?message>);
- GoldSim, produzido pelo The GoldSim Technology Group (<http://www.goldsim.com/Home/>);
- Berkeley Madonna, produzido pela University of California at Berkeley. (<http://www.berkeleymadonna.com/>);
- Simile, produzido pela Simulistics from the University of Edinburgh (<http://www.simulistics.com/>).

#### **4.4.1 O SOFTWARE STELLA**

STELLA é um software desenvolvido pela iSee Systems para modelagem dinâmica, criado para facilitar a construção de modelos que representam interações entre variáveis de um sistema ao longo do tempo, permitindo a análise de comportamentos e a exploração de diferentes cenários. A programação no software STELLA (Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation) é orientada a objetos por meio de uma interface gráfica que permite ao modelador montar diagramas de sistemas usando ícones e fluxogramas. Esses diagramas representam variáveis, estoques (estoques de recursos ou quantidades acumuladas) e fluxos (movimentos entre estoques). Essa interface facilita a compreensão dos sistemas modelados por meio da visualização de seus componentes e suas interações, permitindo a representação do fenômeno real em estudo. No ambiente de modelagem STELLA, o modelador não lida diretamente com as equações diferenciais intrínsecas ao programa, mas estabelece as relações entre as variáveis presentes no sistema em estudo (Doyle e Ford 1998). O software STELLA foi criado com o propósito de facilitar a compreensão de sistemas dinâmicos, permitindo que usuários visualizem e experimentem diferentes variáveis e interações em um ambiente visual intuitivo. Uma das principais características do software STELLA é a sua abordagem visual da modelagem. Ele oferece um ambiente gráfico onde o usuário pode criar intuitivamente diagramas de fluxos,

loops de feedback, estoques, variáveis e suas interconexões. Isso permite a criação de modelos com base em uma representação de "estoques e fluxos", o que facilita a compreensão dos sistemas modelados ao torná-los visíveis e mais acessíveis. STELLA permite realizar simulações ao longo do tempo, permitindo a visualização de como as diferentes variáveis do sistema modelado se comportam com base nas condições e interações desse sistema. É possível rodar múltiplos cenários, alterando parâmetros, para entender melhor as consequências de mudanças em políticas, condições de mercado, ou outros fatores dinâmicos.

O software permite que os usuários modelem uma ampla gama de sistemas, sejam eles "abertos" ou "fechados" como descrito no item 4.3.2.1, de forma que os comportamentos e padrões variáveis podem ser observados ao longo do tempo. Isso o torna ideal para simulações de fenômenos que evoluem, como o crescimento populacional, sustentabilidade, dinâmica de mercado, mudanças ambientais e muitos outros exemplos, como a dinâmica de geração de resíduos oleosos, apresentada no modelo ora proposto.

#### **4.4.2 POR QUÊ STELLA, E NÃO ITHINK?**

STELLA e iThink são ambos softwares de modelagem dinâmica desenvolvidos pela iSee Systems, com muitas características e funcionalidades em comum. No entanto, são voltados para públicos e propósitos diferentes. STELLA e iThink compartilham a mesma base de modelagem dinâmica, mas diferem em seus públicos-alvo e no contexto de uso, sendo iThink projetado para profissionais e empresas que buscam simular e otimizar seus processos de negócios, enquanto STELLA é mais voltado para educação e pesquisa acadêmica.

iThink é direcionado especificamente para o mundo empresarial e de negócios. Foi projetado para ser uma ferramenta de apoio à tomada de decisões estratégicas e à solução de problemas organizacionais. Embora iThink utilize os mesmos princípios fundamentais do STELLA, incluindo a modelagem baseada em estoques e fluxos, suas aplicações são mais direcionadas a áreas como gestão de processos, operações,

marketing, logística, finanças e planejamento estratégico. O objetivo principal de iThink é auxiliar empresas a visualizar, testar e melhorar seus processos através da criação de modelos que representam o funcionamento de sistemas empresariais, permitindo que os usuários identifiquem gargalos, ineficiências e oportunidades de melhoria em sistemas organizacionais.

Por sua vez, STELLA permite simulações realizadas ao longo do tempo, permitindo a visualização de como diferentes variáveis se comportam com base nas condições e interações do sistema. É possível rodar múltiplos cenários, por meio de alterações nos parâmetros adotados no modelo, permitindo uma melhor compreensão das consequências das mudanças ao longo do tempo sobre o sistema modelado. STELLA é mais utilizado em ambientes acadêmicos e educacionais, uma vez que foi projetado inicialmente para o ensino e demonstração da dinâmica de sistemas, especialmente em disciplinas como ciências, engenharia, economia e ecologia. Ele facilita a compreensão de sistemas complexos ao permitir que os usuários construam e simulem modelos visualmente. Seu foco está em tornar acessíveis conceitos de modelagem para estudantes, professores e pesquisadores.

Embora não seja objeto do presente estudo, vale citar o fato de que uma condição interessante que indica o uso de STELLA para a modelagem de sistemas dinâmicos é a possibilidade de conversão dos modelos desenvolvidos em STELLA para a linguagem R por meio do software StellaR, o qual traduz um modelo Stella em um modelo em R, uma linguagem de programação de alto nível de código aberto. Isso permite o uso de ferramentas de modelagem conceitual fornecidas no Stella, juntamente com a funcionalidade computacional e a flexibilidade de programação fornecidas no R (Naimi e Volnov, 2012).

Por último, uma das principais razões para a escolha de STELLA para a modelagem é que embora o desenvolvimento de um modelo seja em geral uma tarefa bastante desafiadora, uma vez que o modelador precisa não só ter uma boa compreensão do sistema a ser modelado, mas também um razoável conhecimento matemático, uma das principais características da modelagem por STELLA é sua

acessibilidade direta às características do sistema a ser modelado, dispensando o conhecimento de cálculos complexos ou equações diferenciais para desenvolver um modelo matemático. Na verdade, os conceitos do sistema modelado são apresentados de forma clara, utilizando apenas texto, gráficos e álgebra básica. Assim, embora o conhecimento avançado de matemática possa ser útil, ele é bem menos importante que as habilidades de pensamento crítico e conhecimentos específicos do sistema a ser modelado (Gonzalez, 2019).

#### **4.5 DESENVOLVIMENTO DO MODELO**

O desenvolvimento do modelo foi concebido com o objetivo de disponibilizar um modelo de dinâmica de sistemas que permita estimar a quantidade de diferentes tipos de resíduos oleosos gerados a partir da resposta por meio da contenção e recolhimento a derramamentos de óleo no oceano.

A ocorrência de um vazamento de petróleo implica na imediata aplicação de uma série de estratégias de resposta, no intuito de o mais rápido possível interromper o vazamento, remover do ambiente a maior quantidade possível do óleo vazado e dar a esse poluente uma destinação final segura e adequada. Para tal, são utilizadas diversas metodologias de combate ao vazamento de óleo, sintetizadas nas técnicas de contenção e recolhimento, dispersão mecânica e química, e queima local, cada qual sendo responsável pela geração de distintos volumes e tipos de resíduos.

Na presente pesquisa, o modelo tem seu foco direcionado aos resíduos oleosos gerados pelas operações de contenção e recolhimento do óleo em suspensão na água, desconsiderando outros tipos de resíduos que podem ser gerados pela dispersão química, pela queima local, e pelos resíduos gerados pelo combate ao óleo que chegue à costa. Outros modelos, baseados em semelhantes premissas, podem ser desenvolvidos com esses objetivos específicos ou mesmo com o objetivo de cômputo do somatório total de resíduos oleosos gerados.

Embora necessária, a pronta aplicação das estratégias de resposta a vazamentos de petróleo pode implicar em uma rápida geração e acumulação de resíduos oleosos, que rapidamente podem extrapolar a capacidade da infraestrutura local de recebimento e gestão desses resíduos tendo em vista a possibilidade de geração de resíduos em volume ainda maior do que o próprio volume do vazamento. Caso não haja um prévio planejamento e disponibilização local de recursos capazes de gerar uma adequada infraestrutura de gestão de resíduos, em curto espaço de tempo as operações de limpeza e recuperação do óleo podem ser atrasadas ou mesmo interrompidas temporariamente (IPIECA-IOGP, 2014).

Diante dessas premissas, optou-se por direcionar o modelo especificamente para a estimativa de geração de resíduos oleosos por conta de sua relevância dentro do contexto geral de geração de resíduos em casos de vazamentos de óleo em cenários offshore.

#### 4.5.1 TIPOS DE RESÍDUOS OLEOSOS GERADOS

Os resíduos oleosos gerados em função da aplicação das estratégias de resposta a vazamentos de óleo offshore são divididos basicamente em duas categorias de resíduos, formadas por resíduos líquidos oleosos e resíduos sólidos oleosos (IPIECA-IOGP, 2015; POSOW, 2016), e subcategorias de acordo com o tipo de resíduos gerados, conforme detalhado na Tabela 10:

Tabela 10: Tipologias de resíduos oleosos.

CATEGORIA	SUBCATEGORIA	DEFINIÇÃO DOS RESÍDUOS
Resíduos líquidos	Óleo recuperado	Óleo recuperado por meio de material absorvente (barreiras e mantas).
		Óleo recuperado por meio de skimmers e current busters.
	Água oleosa	Água oleosa gerada pela lavagem de embarcações, EPI's, skimmers, barreiras oceânicas, tanques das embarcações e tanques temporários

		Água oleosa gerada pela coleta de óleo por skimmers e current busters.
<b>Resíduos sólidos</b>	Resíduos sólidos oleosos	Resíduos sólidos gerados por EPI's contaminados (botas, luvas e macacões).
		Resíduos sólidos gerados por material absorvente contaminado (barreiras e mantas).

# CAPÍTULO 5

## CONCEPÇÃO GERAL DO MODELO DE ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS

**“ Não acredite em algo simplesmente porque ouviu. Não acredite em algo simplesmente porque todos falam a respeito. Não acredite em algo simplesmente porque está escrito em seus livros religiosos. Não acredite em algo só porque seus professores e mestres dizem que é verdade. Não acredite em tradições só porque foram passadas de geração em geração. Mas depois de muita análise e observação, se você vê que algo concorda com a razão e que conduz ao bem e benefício de todos, aceite-o e viva-o. ”**

Siddhartha Gautama (Buda)

☆ 563 a.C. / † 483 a.C.

## 5 CONCEPÇÃO GERAL DO MODELO DE ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS

O desenvolvimento do modelo foi concebido com o objetivo de disponibilizar um modelo de dinâmica de sistemas que permita “estimar a quantidade de diferentes tipos de resíduos oleosos gerados a partir da resposta a derramamentos de óleo no oceano”.

A ocorrência de um vazamento de óleo implica na imediata aplicação da estrutura de resposta disponível, composta em parte por ações que visam solubilizar o óleo na coluna d'água por meio de dispersantes químicos, pela dispersão mecânica realizada por meio de embarcações, ou pela queima local do óleo em suspensão no mar. Essas técnicas têm o objetivo basicamente de reduzir o volume do óleo no ambiente, ainda que seus resíduos possam implicar em elevada toxicidade para a fauna e flora marinhas e gerar emissões atmosféricas de compostos tóxicos.

Por outro lado, a contenção e o recolhimento é uma ação de resposta complexa e abrangente, cuja boa implementação é diretamente relacionada à boa compreensão dos fatores físico-químicos e biológicos descritos nos itens 2.6.1 a 2.6.11, na medida em que pode lidar com o óleo em seu estado original, submetido a alterações e em diferentes estágios de emulsão, em geral contendo elevadas concentrações de água. Ao contrário das demais ações de resposta que visam a redução do volume do óleo no ambiente, a contenção e o recolhimento têm a característica de atuar diretamente sobre o óleo em suspensão na coluna d'água, o que é fator determinante para a geração de grandes volumes de resíduos oleosos, muitas vezes em montantes ainda superiores ao tamanho do vazamento.

A rápida implantação dos equipamentos de contenção e recolhimento é fundamental para o sucesso da recuperação mecânica. A recuperação de petróleo no mar é uma corrida contra o tempo em função do intemperismo e dos processos físico-químicos e biológicos descritos nos itens 2.6.1 a 2.6.11, que passam a atuar sobre óleo tão logo entra em contato com o ambiente marinho. Além disso, assim que o óleo é liberado na água, ele começa a se espalhar e ao longo do tempo pode formar filmes muito finos, em espessuras da ordem de alguns poucos microns. O óleo também pode se dividir em manchas, o que dificulta a coleta e a recuperação. As embarcações

envolvidas precisam manobrar em meio a essas manchas e coletá-las em camadas mais espessas para permitir uma recuperação mais eficaz pelos *skimmers* e *current busters*. O óleo na água não se espalha de maneira uniforme e sua espessura varia dentro de uma mesma mancha. As áreas mais espessas da mancha geralmente ocupam uma porção relativamente pequena da área total contaminada, mas contêm a maior parte do volume de óleo. *Skimmers* e *current busters* implantados nas manchas mais espessas de óleo de superfície serão mais eficazes, potencialmente podendo recuperar 100 vezes mais óleo do que recuperaria ao atuar em filmes oleosos mais finos. A primeira etapa das operações de recuperação é encurralar e conter o óleo, a fim de evitar sua dispersão, criando uma área de mancha mais propícia para os recolhedores, que separam o óleo da água oleosa e movem os fluidos recuperados para um armazenamento temporário antes de serem transferidos para a costa para reciclagem ou descarte (NAS, 2022).

A ocorrência de um vazamento de óleo em ambiente offshore implica que desde seus momentos iniciais tenha início uma série de processos físico-químico e biológicos de intemperismo, conforme descrito nos itens 2.6.1 a 2.6.11. Alguns desses processos tem a característica de remover parte do óleo do ambiente marinho, como a evaporação, a foto-oxidação e a biodegradação, enquanto outros atuam na movimentação do óleo entre a superfície até o assoalho marinho, como a mistura turbulenta, sedimentação e emersão. O restante do óleo que não é removido ou deslocado pela coluna d'água pelos processos de intemperismo passam a fazer parte das frações de óleo que mais chamam atenção em um vazamento, quais sejam, o óleo em superfície e o óleo que faz toque na costa.

As modelagens hidrodinâmica e de dispersão de óleo são empregadas para prever o destino e o comportamento do óleo derramado, caracterizando-se como uma importante ferramenta de planejamento de contingência em derramamentos de óleo e gerenciamento costeiro.

Nas modelagens hidrodinâmicas e de dispersão de óleo que são encaminhadas ao IBAMA nos processos de licenciamento ambiental, são apresentados balanços de massa que indicam a movimentação do óleo para quantificar seus volumes distribuídos

na superfície e coluna d'água, no assoalho marinho, na costa, bem como as frações que tenham evaporado, dispersado, degradado, etc. Tendo em vista que o foco da presente pesquisa é a modelagem dos resíduos oleosos gerados pelo combate ao óleo em superfície, ao utilizar os balanços de massa passamos a ter uma estimativa do comportamento do óleo nesse compartimento ao longo de todo o período previsto pela modelagem, e a partir dessas informações fazer os cálculos necessários por intermédio do modelo de geração de resíduos para estimar os volumes de óleo recuperado, resíduos sólidos oleosos e água oleosa a serem gerados em função da contenção e recolhimento desse óleo em superfície.

A concepção geral do modelo é apresentada na Figura 10, onde observa-se que sua estrutura foi concebida com base em 3 submodelos que atuam em conjunto, cada qual sendo responsável pela estimativa de um tipo de resíduo oleoso gerado pelas operações de contenção e recolhimento do óleo derramado, localizado em superfície. O “Submodelo de óleo recuperado”, apresentado na cor azul (em detalhe na Figura 14), trata da estimativa da massa de óleo recuperado em superfície, expressa em toneladas (Massa total de óleo recuperado em toneladas - MTORT). O “Submodelo de resíduos sólidos oleosos”, apresentado na cor verde (em detalhe na Figura 20), trata da estimativa da massa gerada por resíduos sólidos de materiais absorventes e EPI's contaminados por óleo, expressa em toneladas (Massa total de resíduos sólidos oleosos em toneladas - MTRST). Por último, o “Submodelo de água oleosa”, apresentado na cor marrom (em detalhe na Figura 24), trata da estimativa da massa de água oleosa gerada por skimmers e current busters, e descontaminação de embarcações, EPI's e equipamentos expressa em toneladas (Massa total de água oleosa em toneladas - MTAOT).

Embora o modelo seja formado por 3 submodelos aparentemente desconectados como observado na Figura 10, existem conexões entre eles, que são feitas por meio da repetição de elementos originais de um subconjunto em outro subconjunto com o qual tenha ligação, conforme explicado no item 4.3.4.6. Essas conexões reproduzem os valores originais do elemento de um submodelo em um outro submodelo com o qual haja uma conexão. As conexões entre os submodelos não são

feitas por meio de conectores visíveis, pois se assim o fosse feito, a apresentação gráfica do modelo seria caótica, o que dificultaria ou até mesmo impediria a compreensão da dinâmica dos submodelos e do modelo como um todo, como pode-se observar na Figura 11. Gráficamente, essas conexões são representadas pela reprodução do elemento original com contornos tracejados em vez do uso de um conector, com o posicionamento do elemento no local mais adequado conforme como pode ser visto na Figura 12.

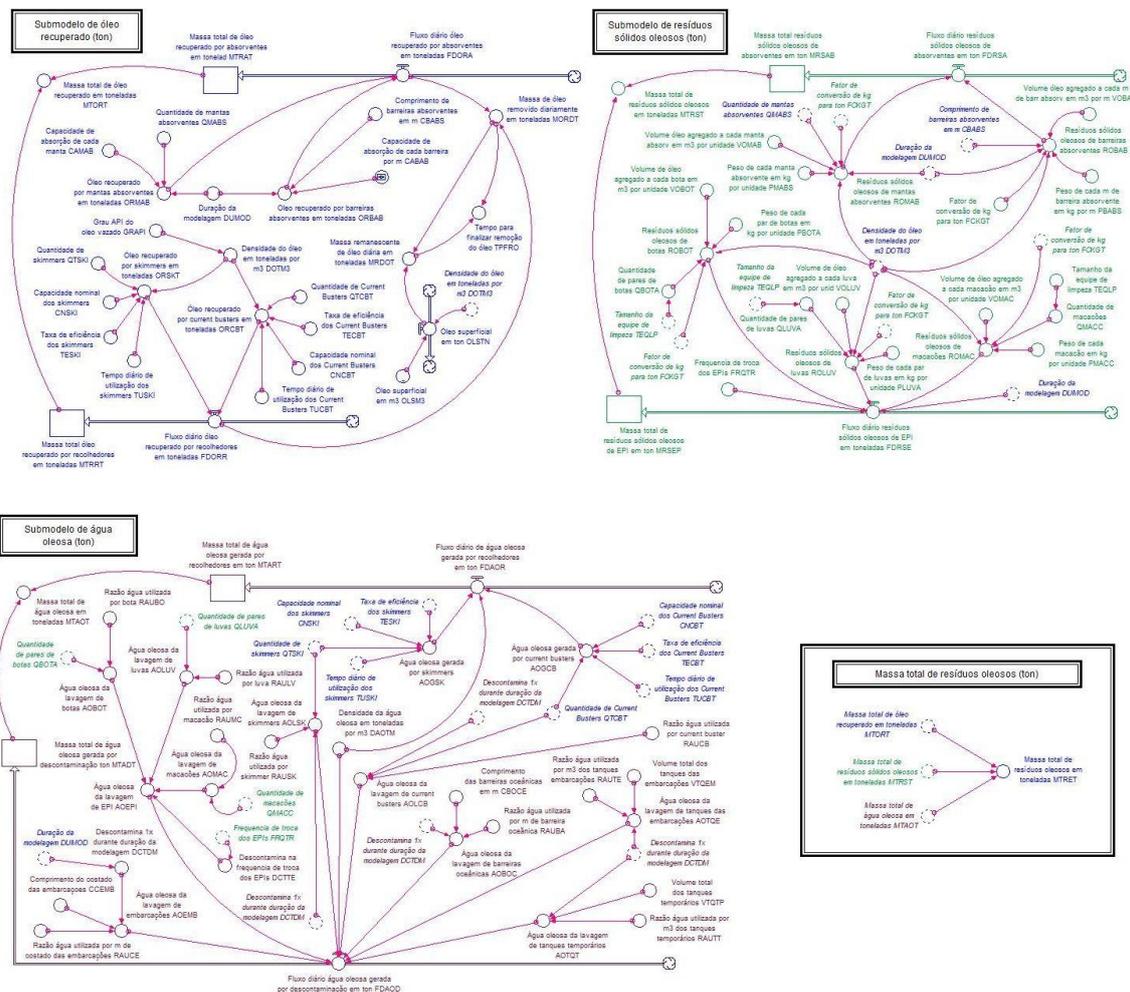


Figura 10: Concepção geral do modelo.

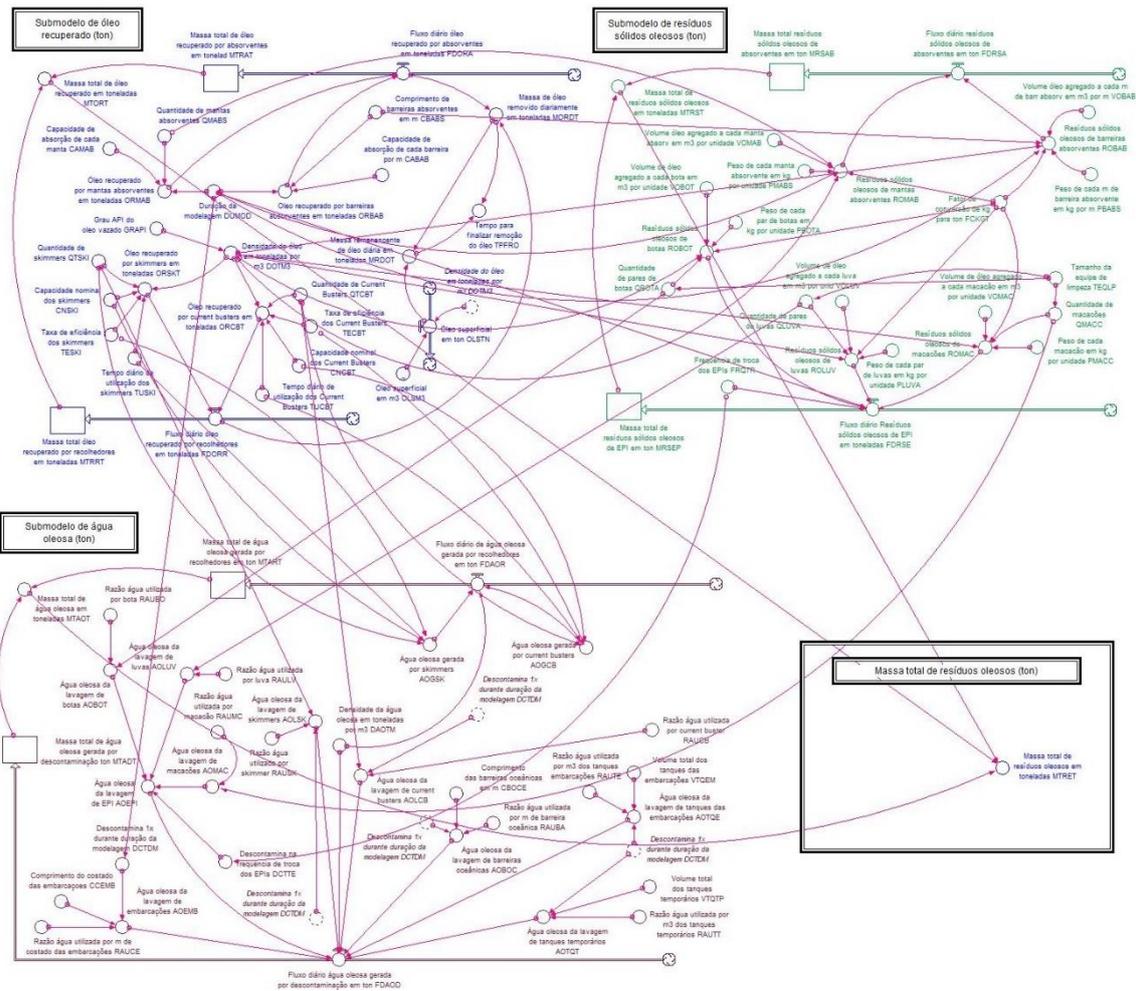


Figura 11: O mesmo modelo, apresentando as conexões entre os submodelos.



Figura 12: Ligação entre os elementos, sem (esquerda) e com (direita) conector.

A conexão do “Submodelo de resíduos sólidos oleosos” com o “Submodelo de óleo recuperado” é feita pelos elementos “Quantidade de mantas absorventes (QMABS)”, “Comprimento de barreiras absorventes em m (CBABS)”, “Densidade do óleo em toneladas por m<sup>3</sup> (DOTM3)” e “Duração da modelagem (DUMOD)”. Por sua vez, o “Submodelo de água oleosa” é conectado ao “Submodelo de óleo recuperado” pelos elementos “Duração da modelagem (DUMOD)”, “Capacidade nominal dos skimmers (CNSKI)”, “Quantidade de skimmers (QTSKI)”, “Tempo diário de utilização dos skimmers (TUSKI)”, “Taxa de eficiência dos skimmers (TESKI)”, “Capacidade nominal dos current busters (CNCBT)”, “Quantidade de current busters (QTCBT)”, “Tempo diário de utilização dos current busters (TUCBT)” e “Taxa de eficiência dos current busters (TECBT)”. O “Submodelo de água Oleosa” também se conecta ao “Submodelo de resíduos sólidos oleosos” pelos elementos “Quantidade de pares de botas (QBOTA)”, “Quantidade de pares de luvas (QLUVA)”, “Quantidade de macacões (QMACC)” e “Frequência de troca dos EPI’s (FRQTR)”.

Por último, a “Massa total de resíduos oleosos em toneladas (MTRET)” é calculada pela soma das massas calculadas em “MTORT”, “MTRST” e “MTAOT”, conforme apresentado na Figura 9.

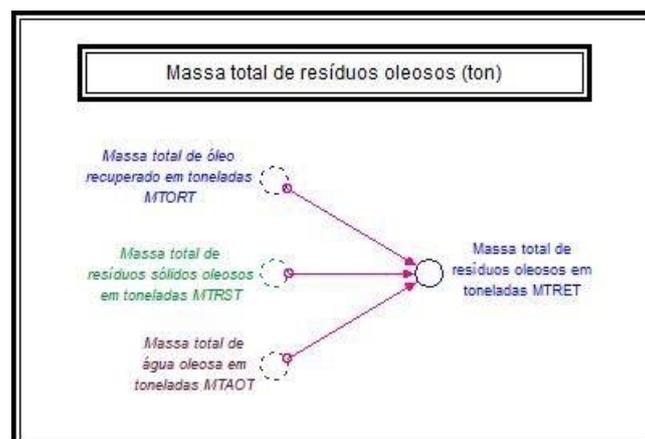


Figura 13: Massa total de resíduos oleosos em toneladas (MTRET).

### 5.1 EQUAÇÕES REFERENTES AO SUBMODELO DE ÓLEO RECUPERADO

O “Submodelo de óleo recuperado” apresenta as estimativas das massas de óleo recuperadas a partir das quantidades e especificações dos equipamentos e materiais de resposta disponíveis, conforme são definidos em um Plano de Emergência Individual (PEI). Para a demonstração do modelo de geração de resíduos foram utilizados os equipamentos e materiais de resposta do Plano de Emergência Individual do Sistema Definitivo (SD) do Campo de Atlanta, na Bacia de Santos, em seu Apêndice H (ENAUTA, 2021), já apresentados na Tabela 8. Dois grupos distintos de equipamentos e materiais são definidos no modelo. Por um lado, a remoção de óleo ocorre por conta de materiais absorventes, mantas (ORMAB) e barreiras absorventes (ORBAB), e por outro, o óleo é removido por equipamentos recolhedores, skimmers (ORSKT) e current busters (ORCBT). De acordo com a disponibilidade de equipamentos e materiais de resposta previstos no PEI, ou com quantitativos adicionais, o responsável pela modelagem pode fazer várias estimativas da massa de óleo recolhida por skimmers (ORSKT), por current busters (ORCBT), por mantas absorventes (ORMAB) e por barreiras absorventes (ORBAB) gerando fluxos diários da massa de óleo recuperado por recolhedores (FDORR) e por material absorvente (FDORA), os quais, por sua vez, respectivamente determinam o estoque MTRRT que corresponde à massa total de óleo recuperado por recolhedores e o estoque MTRAT que corresponde à massa total de óleo recuperada por materiais absorventes. A soma dos estoques MTRAT e MTRRT gera o volume total de óleo recuperado (MTORT), em toneladas. Todos esses parâmetros são manipuláveis no modelo na medida em que as quantidades de skimmers, current busters e material absorvente e suas respectivas características (comprimento, quantidades, capacidades de absorção, capacidade nominal e eficiência dos recolhedores, tempo de uso do recolhedores, etc.) podem ser alteradas pelo modelador de acordo com suas expectativas de disponibilidade de recursos de resposta e massas de óleo efetivamente encontradas em campo. Essa liberdade de manipulação também se aplica nos demais submodelos, de resíduos sólido oleosos e de água oleosa.

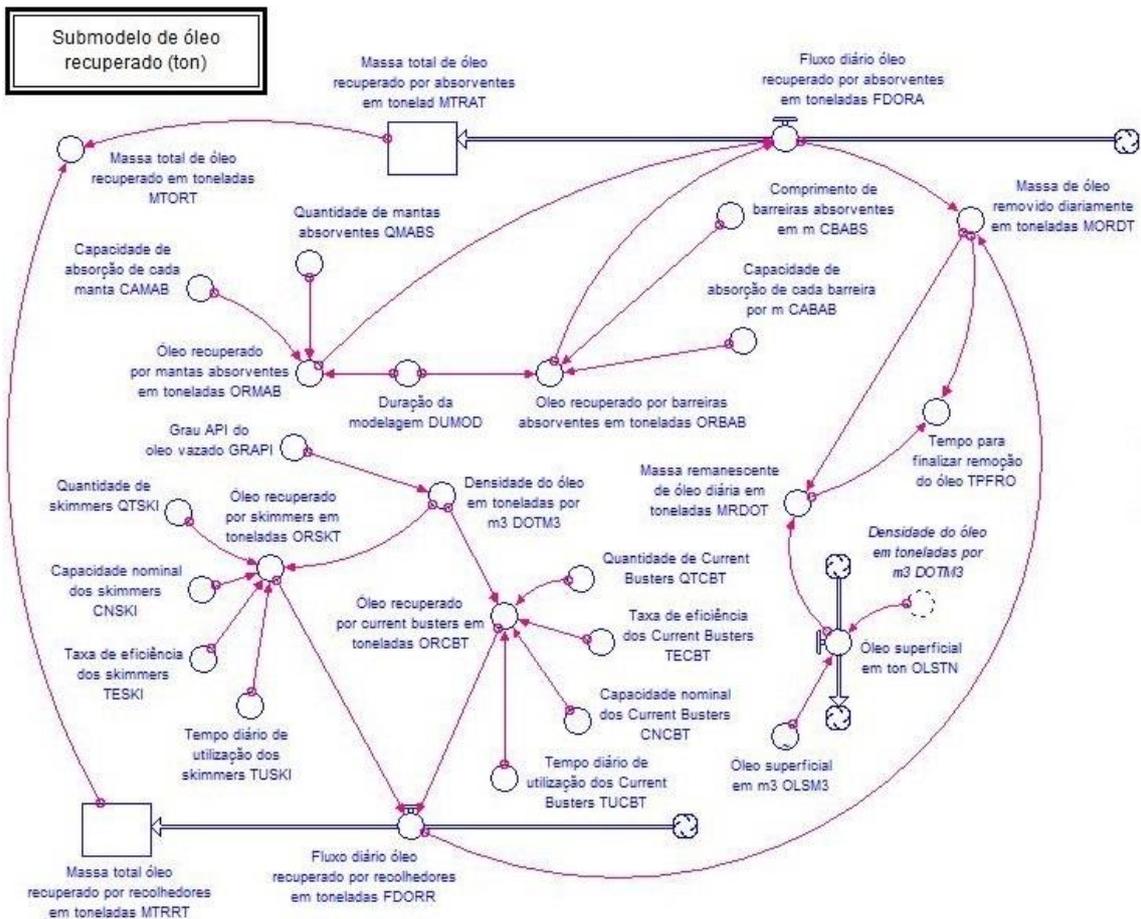


Figura 14: Submodelo de estimativa da massa total de óleo recuperado em toneladas (MTORT).

### 5.1.1 CONVERSÃO DO VOLUME DE ÓLEO EM M<sup>3</sup> (OLSM3) PARA MASSA EM TONELADAS (OLSTN)

O "Submodelo de óleo recuperado" estabelece a conversão do volume de óleo derramado (OLSM3), que em geral é estimado em m<sup>3</sup> ou barris, para sua correspondente massa em toneladas (OLSTN). Tal importância decorre do fato de que uma vez que o modelo gera como valores de saída óleo recuperado e água oleosa, que são resíduos líquidos, além de resíduos sólidos oleosos, a melhor forma de estimar a geração total de resíduos é uniformizar seus valores para sua massa em toneladas. Os valores adotados para OLSM3 correspondem a volumes variáveis em m<sup>3</sup> expressos na Tabela 4 que apresenta os volumes diários de óleo em superfície ao longo dos 31 dias de simulação. A conversão dos volumes diários em m<sup>3</sup> em OLSM3 para suas correspondentes massas diárias em toneladas em OLSTN é feita pelo produto entre OLSM3 e DOTM3, que por

sua vez corresponde à conversão do Grau API do óleo em sua correspondente densidade em ton/m<sup>3</sup>.



Figura 15: Conversão do volume do óleo em m<sup>3</sup> para massa em toneladas.

#### 5.1.1.1 OLSTN: Óleo superficial em toneladas.

$$\text{OLSTN} = \text{OLSM3} \times \text{DOTM3}$$

Equação 2: Óleo superficial em toneladas.

$$\text{OLSTN} = \text{Volume variável em } \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \text{ (Tabela 4)} \times 0,97 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} = \frac{\text{"y" ton}}{\text{dia}}$$

#### 5.1.1.1.1 OLSM3: Óleo superficial em m<sup>3</sup>.

$$\text{OLSM3} = \text{Volume variável em } \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \text{ (Tabela 4)}$$

Equação 3: Óleo superficial em m<sup>3</sup>.

#### 5.1.1.1.2 DOTM3: Densidade do óleo em toneladas por m<sup>3</sup>.

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141,5}{\text{densidade}} - 131,5 \Leftrightarrow \text{DOTM3} = \frac{141,5}{\text{GRAPI} + 131,5}$$

$$\text{DOTM3} = \frac{141,5}{13,7 + 131,5} = \frac{0,97 \text{ ton}}{\text{m}^3}$$

Equação 4: Densidade do óleo em toneladas por m<sup>3</sup>.

Tabela 11: Equações e valores referentes à conversão do volume de óleo em m<sup>3</sup> (OLSM3) para massa em toneladas (OLSTN).

CÓDIGO	ITEM	EQUAÇÃO OU VALOR	UNIDADE	FONTE
<b>DOTM3</b>	Densidade do óleo em toneladas por m <sup>3</sup>	$DOTM3 = \frac{141,5}{GRAPI + 131,5}$	ton/m <sup>3</sup>	Autor
<b>GRAPI</b>	Grau API do óleo vazado	13,7	°API	ENAUTA, 2022
<b>OLSM3</b>	Óleo superficial em m <sup>3</sup>	Variável diariamente, de acordo com a Tabela 4	m <sup>3</sup> /dia	ENAUTA, 2022
<b>OLSTN</b>	Óleo superficial em toneladas	$OLSTN = OLSM3 \times DOTM3$	ton/dia	Autor

### 5.1.2 MASSA DE ÓLEO REMOVIDA DIARIAMENTE (MORDT), MASSA DE ÓLEO REMANESCENTE DIÁRIA (MRDOT) E TEMPO PARA FINALIZAR A REMOÇÃO DO ÓLEO (TPFRO)

O “Submodelo de óleo recuperado” permite estimar o tempo necessário à conclusão das operações de contenção e recolhimento (TPFRO), tendo como base as previsões de massa de óleo removida diariamente (MORDT) e de massa remanescente diária (MRDOT). Essa é uma informação bastante relevante para o modelador, na medida em que permite avaliar previamente se a estrutura de resposta, acolhimento, tratamento e destinação final dos resíduos oleosos gerados está devidamente dimensionada. Com base no somatório dos fluxos diários de óleo recuperado por absorventes (FDORA) e por recolhedores (FDORR), o submodelo calcula a massa de óleo removida diariamente em toneladas (MORDT). Por sua vez, a massa de óleo que permanece diariamente no ambiente (MRDOT) é calculada pela diferença entre o óleo superficial diário em toneladas (OLSTN), já descrito no item anterior e a massa de óleo removida diariamente em toneladas (MORDT). Por último, o cálculo do tempo para finalizar a remoção do óleo (TPFRO) é feito pela razão entre a massa remanescente de óleo diária em toneladas (MRDOT) e a massa de óleo removida diariamente em toneladas/dia (MORDT), resultando no número de dias que restam até esgotar a massa de óleo a ser recolhida.

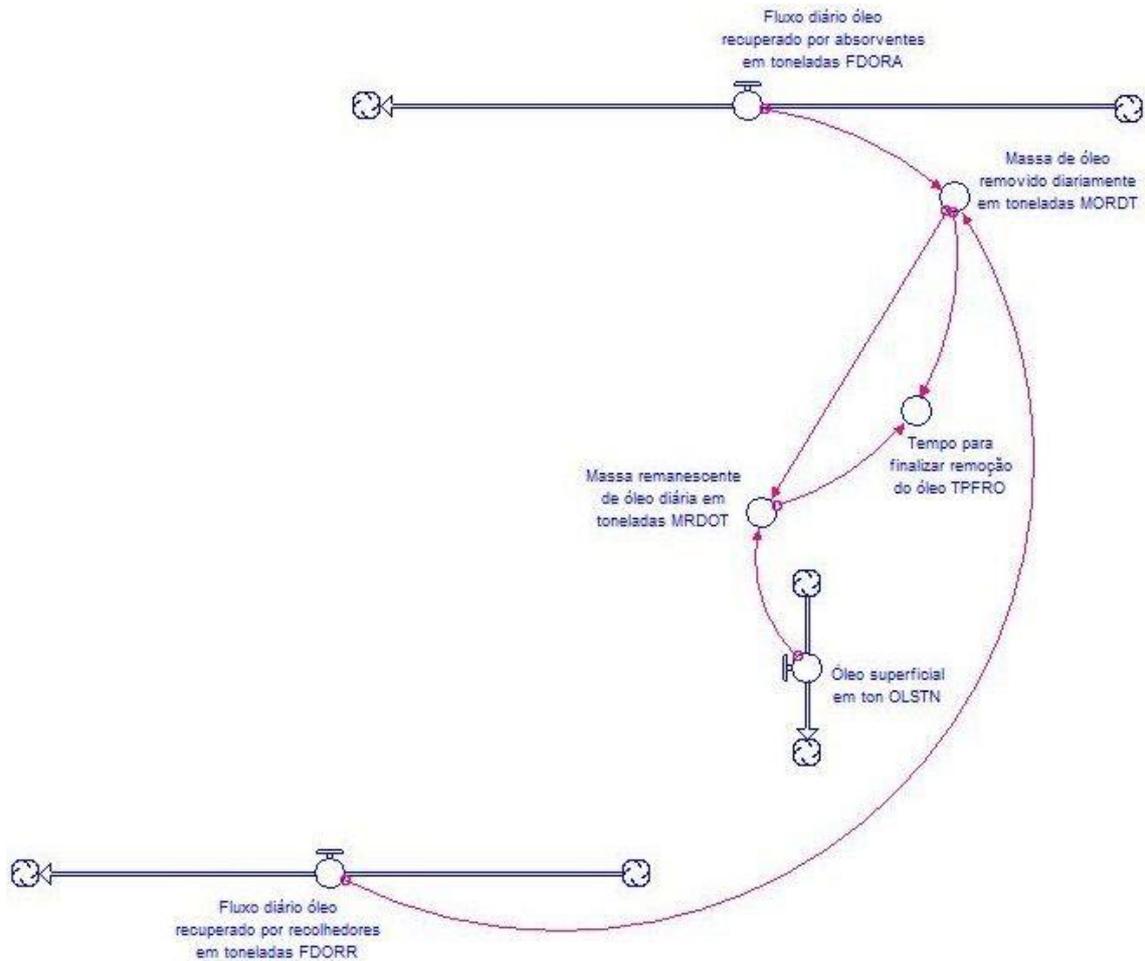


Figura 16: Massa de óleo removida diariamente (MORDT), massa remanescente de óleo diária (MRDOT) e tempo para finalizar a remoção do óleo (TPFRO).

#### 5.1.2.1 TPFRO: Tempo para finalizar remoção do óleo.

$$\text{TPFRO} = \frac{\text{MRDOT}}{\text{MORDT}}$$

Equação 5: Tempo para finalizar remoção do óleo.

$$\text{TPFRO} = \frac{\left( \text{Volume variável em } \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \text{ (Tabela 4)} \times 0,97 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right) - \frac{4.146,00 \text{ ton}}{\text{dia}}}{\frac{4.146,00 \text{ ton}}{\text{dia}}}$$

= "n" dias

### 5.1.2.1.1 MORDT: Massa de óleo removido diariamente em toneladas.

$$\text{MORDT} = \text{FDORA} + \text{FDORR}$$

*Equação 6: Massa de óleo removido diariamente em toneladas.*

$$\text{MORDT} = \frac{72 \text{ ton}}{\text{dia}} + \frac{4.074,00 \text{ ton}}{\text{dia}} = \frac{4.146,00 \text{ ton}}{\text{dia}}$$

### 5.1.2.1.2 MRDOT: Massa remanescente de óleo diária em toneladas.

$$\text{MRDOT} = \text{OLSTN} - \text{MORDT}$$

*Equação 7: Massa remanescente de óleo diária em toneladas.*

$$\begin{aligned} \text{MRDOT} &= \left( \text{Volume variável em } \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} (\text{Tabela 4}) \times 0,97 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right) - \frac{4.146,00 \text{ ton}}{\text{dia}} \\ &= \frac{\text{"x" ton}}{\text{dia}} \end{aligned}$$

*Tabela 12: Equações referentes à massa de óleo removida diariamente (MORDT), massa de óleo remanescente diária (MRDOT) e tempo para finalizar o recolhimento do óleo (TPFRO).*

CÓDIGO	ITEM	EQUAÇÃO	UNIDADE	FONTE
<b>FDORR</b>	Fluxo diário de óleo recuperado por recolhedores em toneladas	$\text{FDORR} = \text{ORCBT} + \text{ORSKT}$	ton/dia	Autor
<b>FDORA</b>	Fluxo diário de óleo recuperado por absorventes em toneladas	$\text{FDORA} = \text{ORBAB} + \text{ORMAB}$	ton/dia	Autor
<b>MORDT</b>	Massa de óleo removido diariamente em toneladas	$\text{MORDT} = \text{FDORA} + \text{FDORR}$	ton/dia	Autor
<b>MRDOT</b>	Massa remanescente de óleo diária em toneladas	$\text{MRDOT} = \text{OLSTN} - \text{MORDT}$	ton	Autor
<b>OLSTN</b>	Óleo superficial em toneladas	$\text{OLSTN} = \text{OLSM3} \times \text{DOTM3}$	ton/dia	Autor
<b>TPFRO</b>	Tempo para finalizar remoção do óleo	$\text{TPFRO} = \frac{\text{MRDOT}}{\text{MORDT}}$	dias	Autor

### 5.1.3 ÓLEO DIÁRIO RECUPERADO POR ABSORVENTES (FDORA)

O fluxo diário de óleo recuperado por absorventes (FDORA) é resultado da soma do óleo recuperado por mantas absorventes (ORMAB) e barreiras absorventes (ORBAB), os quais expressam as respectivas estimativas de volumes diários. O volume de óleo diário no fluxo FDORA é transferido ao longo de toda a duração da simulação (DUMOD), ao estoque MTRAT que inicia a simulação com valor inicial = 0,00, fazendo com que seu valor ao final da simulação corresponda à massa total de óleo recuperada por absorventes (MTRAT). Observe-se que não ocorre a conversão de m<sup>3</sup> para tonelada, visto que as capacidades de absorção de óleo das mantas (CAMAB) e das barreiras absorventes (CABAB) já são apresentadas respectivamente em ton/unidade e ton/m.

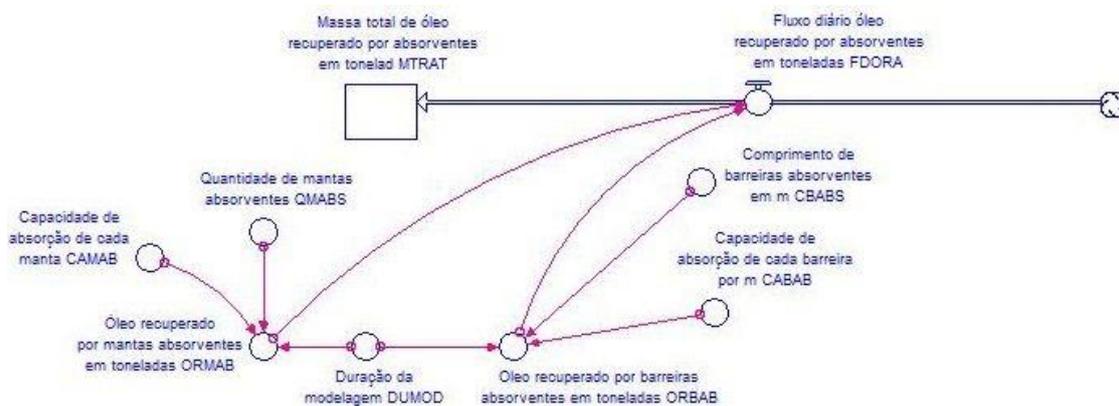


Figura 17: Fluxo diário de óleo recuperado por absorventes (FDORA).

#### 5.1.3.1 FDORA: Fluxo diário de óleo recuperado por absorventes em toneladas.

$$FDORA = ORBAB + ORMAB$$

Equação 8: Fluxo diário de óleo recuperado por absorventes em toneladas.

$$FDORA = \frac{72 \text{ ton}}{\text{dia}} + \frac{0 \text{ ton}}{\text{dia}} = \frac{72 \text{ ton}}{\text{dia}}$$

##### 5.1.3.1.1 ORMAB: Óleo recuperado por mantas absorventes em toneladas.

$$ORMAB = \frac{CAMAB \times QMABS}{DUMOD}$$

Equação 9: Óleo recuperado por mantas absorventes em toneladas.

$$\text{ORMAB} = \frac{\frac{0,00135 \text{ ton}}{\text{unidade}} \times 0 \text{ unidades}}{31 \text{ dias}} = \frac{0,00 \text{ ton}}{\text{dia}}$$

#### 5.1.3.1.2 ORBAB: Óleo recuperado por barreiras absorventes em toneladas.

$$\text{ORBAB} = \frac{\text{CABAB} \times \text{CBABS}}{\text{DUMOD}}$$

*Equação 10: Óleo recuperado por barreiras absorventes em toneladas.*

$$\text{ORBAB} = \frac{\frac{0,012 \text{ ton}}{\text{m}} \times 2.000 \text{ m}}{31 \text{ dias}} = \frac{0,77 \text{ ton}}{\text{dia}}$$

#### 5.1.3.2 MTRAT: Massa total de óleo recuperado por absorventes em toneladas.

$$\text{MTRAT} = 0,00 \text{ ton (valor inicial)}$$

*Equação 11: Massa total de óleo recuperado por absorventes em toneladas.*

*Tabela 13: Equações e valores referentes ao óleo diário recuperado por absorventes em toneladas (FDORA).*

CÓDIGO	ITEM	EQUAÇÃO OU VALOR	UNIDADE	FONTE
CABAB	Capacidade de absorção de cada barreira por m	0,012	ton/m	Apêndice 1
CAMAB	Capacidade de absorção de cada manta	0,00135	ton/unidade	Apêndice 1
CBABS	Comprimento de barreiras absorventes em m	2000	m	ENAUTA, 2021 – Apêndice H
DUMOD	Duração da modelagem	31	dias	ENAUTA, 2022
FDORA	Fluxo diário de óleo recuperado por absorventes em toneladas	FDORA = ORBAB + ORMAB	ton/dia	Autor
MTRAT	Massa total de óleo recuperado por absorventes em toneladas	valor inicial = 0	ton	Autor <sup>13</sup>

<sup>13</sup> O valor inicial fica ajustado em “0” em função de ser um estoque que recebe o valor calculado em “FDORA”.

<b>ORBAB</b>	Óleo recuperado por barreiras absorventes em toneladas	$\text{ORBAB} = \frac{\text{CABAB} \times \text{CBABS}}{\text{DUMOD}}$	ton/dia	Autor
<b>ORMAB</b>	Óleo recuperado por mantas absorventes em toneladas	$\text{ORMAB} = \frac{\text{CAMAB} \times \text{QMABS}}{\text{DUMOD}}$	ton/dia	Autor
<b>QMABS</b>	Quantidade de mantas absorventes <sup>14</sup>	0	unidade	ENAUTA, 2021 – Apêndice H

#### 5.1.4 ÓLEO DIÁRIO RECUPERADO POR RECOLHEDORES (FDORR)

O fluxo diário de óleo recuperado por recolhedores (FDORR) é resultado da soma do óleo recuperado por skimmers (ORSKT) e current busters (ORCBT), os quais expressam as respectivas estimativas de volumes diários. O volume de óleo diário no fluxo FDORR é transferido ao longo de toda a duração da simulação (DUMOD), ao estoque MTRRT que inicia a simulação com valor inicial = 0,00, fazendo com que seu valor ao final da simulação corresponda à massa total de óleo recuperada por recolhedores (MTRRT). Neste caso é necessária a conversão de m<sup>3</sup> para toneladas, uma vez que as capacidades nominais dos skimmers (CNSKI) e dos current busters (CNCBT) são expressas em m<sup>3</sup>.

<sup>14</sup> O valor “0” corresponde à ausência de previsão do uso de mantas absorventes conforme definido no Plano de Emergência Individual do Sistema Definitivo (SD) do Campo de Atlanta, na Bacia de Santos, em seu Apêndice H (ENAUTA, 2021).

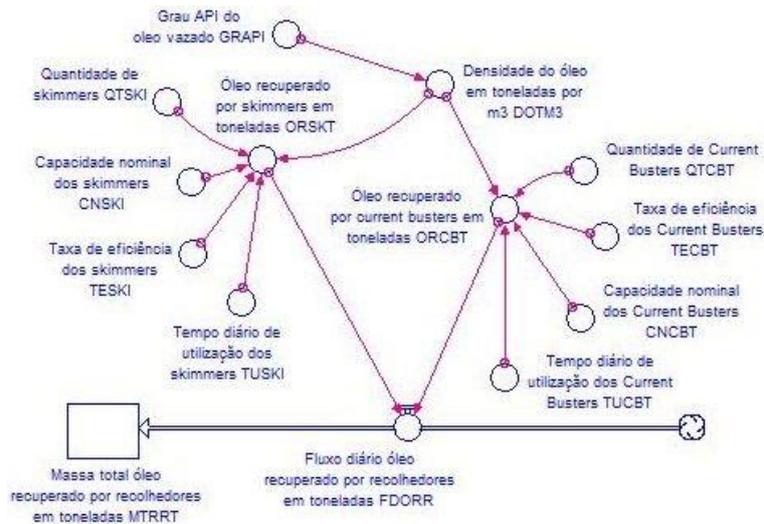


Figura 18: Fluxo diário de óleo recuperado por recolhedores (FDORR)

#### 5.1.4.1 FDORR: Fluxo diário de óleo recuperado por recolhedores em toneladas.

$$FDORR = ORCBT + ORSKT$$

Equação 12: Fluxo diário de óleo recuperado por recolhedores em toneladas.

$$FDORR = \frac{3.259,20 \text{ ton}}{\text{dia}} + \frac{814,80 \text{ ton}}{\text{dia}} = \frac{4.074,00 \text{ ton}}{\text{dia}}$$

##### 5.1.4.1.1 DOTM3: Densidade do óleo em toneladas por m<sup>3</sup>.

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\text{densidade}} - 131,5 \Leftrightarrow DOTM3 = \frac{141,5}{GRAPI + 131,5}$$

Equação 4: Densidade do óleo em toneladas por m<sup>3</sup>.

$$DOTM3 = \frac{141,5}{13,7 + 131,5} = \frac{0,97 \text{ ton}}{\text{m}^3}$$

##### 5.1.4.1.2 ORSKT: Óleo recuperado por skimmers em toneladas.

$$ORSKT = DOTM3 \times QTSKI \times TESKI \times CNSKI \times TUSKI$$

Equação 13: Óleo recuperado por skimmers em toneladas.

$$ORSKT = \frac{0,97 \text{ ton}}{\text{m}^3} \times 1 \times \frac{20}{100} \times \frac{350 \text{ m}^3}{\text{h}} \times \frac{12 \text{ h}}{\text{dia}} = \frac{814,80 \text{ ton}}{\text{dia}}$$

### 5.1.4.1.3 ORCBT: Óleo recuperado por current busters em toneladas.

$$\text{ORCBT} = \text{CNCBT} \times \text{DOTM3} \times \text{QTCBT} \times \text{TECBT} \times \text{TUCBT}$$

*Equação 14: Óleo recuperado por current busters em toneladas.*

$$\text{ORCBT} = \frac{200 \text{ m}^3}{\text{h}} \times \frac{0,97 \text{ ton}}{\text{m}^3} \times 2 \times \frac{70}{100} \times \frac{12 \text{ h}}{\text{dia}} = \frac{3.259,20 \text{ ton}}{\text{dia}}$$

### 5.1.4.2 MTRRT: Massa total de óleo recuperado por recolhedores em toneladas.

$$\text{MTRRT} = 0,00 \text{ ton (valor inicial)}$$

*Equação 15: Massa total de óleo recuperado por recolhedores em toneladas.*

Tabela 14: Equações e valores referentes ao óleo diário recuperado por recolhedores em toneladas (FDORR).

CÓDIGO	ITEM	EQUAÇÃO OU VALOR	UNIDADE	FONTE
CNCBT	Capacidade nominal dos Current Busters	200	m <sup>3</sup> /h	ENAUTA, 2021 – Apêndice H
CNSKI	Capacidade nominal dos skimmers	350	m <sup>3</sup> /h	ENAUTA, 2021 – Apêndice H
DOTM3	Densidade do óleo em toneladas por m <sup>3</sup>	$\text{DOTM3} = \frac{141,5}{\text{GRAPI} + 131,5}$	ton/m <sup>3</sup>	Autor
FDORR	Fluxo diário de óleo recuperado por recolhedores em toneladas	$\text{FDORR} = \text{ORCTB} + \text{ORSKT}$	ton/dia	Autor
GRAPI	Grau API do óleo vazado	13,7	°API	ENAUTA, 2022
MTRRT	Massa total óleo recuperado por recolhedores em toneladas	valor inicial = 0	ton	Autor <sup>15</sup>
ORCBT	Óleo recuperado por current busters em toneladas	$\text{ORCBT} = \text{CNCBT} \times \text{DOTM3} \times \text{QTCBT} \times \text{TECBT} \times \text{TUCBT}$	ton/dia	Autor
ORSKT	Óleo recuperado por skimmers em toneladas	$\text{ORSKT} = \text{DOTM3} \times \text{QTSKI} \times \text{TESKI} \times \text{CNSKI} \times \text{TUSKI}$	ton/dia	Autor

<sup>15</sup> O valor inicial fica ajustado em “0” em função de ser um estoque que recebe o valor calculado em “MTRRT”.

<b>QTCBT</b>	Quantidade de Current Busters	2	unidade	ENAUTA, 2021 – Apêndice H
<b>QTSKI</b>	Quantidade de skimmers	1	unidade	ENAUTA, 2021 – Apêndice H
<b>TECBT</b>	Taxa de eficiência dos Current Busters	70	%	ENAUTA, 2021 – Apêndice H
<b>TESKI</b>	Taxa de eficiência dos skimmers	20	%	ENAUTA, 2021 – Apêndice H
<b>TUCBT</b>	Tempo diário de utilização dos Current Busters	12	horas/dia	Autor <sup>16</sup>
<b>TUSKI</b>	Tempo diário de utilização dos skimmers	12	horas/dia	Autor

### 5.1.5 MASSA TOTAL DE ÓLEO RECUPERADO EM TONELADAS (MTORT)

Os fluxos diários de óleo recuperados por absorventes (FDORA) e recolhedores (FDORR) são transferidos ao longo de toda a duração da simulação (DUMOD), aos estoques MTRAT e MTRRT que iniciam a simulação com valores iniciais = 0,00, fazendo com que seus valores ao final da simulação correspondam à massa total de óleo recuperada por absorventes (MTRAT) e à massa total de óleo recuperada por recolhedores (MTRRT). Observe-se que não ocorre a conversão de m<sup>3</sup> para tonelada, visto que as massas de óleo em MTRAT e MTRRT já são apresentadas em toneladas. Por último, as massas de óleo recuperado expressas em MTRAT e MTRRT são somadas, gerando a massa total de óleo recuperado em toneladas (MTORT), o que finaliza o “Submodelo de óleo recuperado”.

<sup>16</sup> No Plano de Emergência Individual do Sistema Definitivo (SD) do Campo de Atlanta, não consta a informação de tempo de uso diário de skimmers e current busters. O valor de 12 horas diárias de uso desses equipamentos foi estipulado pelo autor com base no tempo médio de luz solar, período considerado seguro para esse tipo de operação.

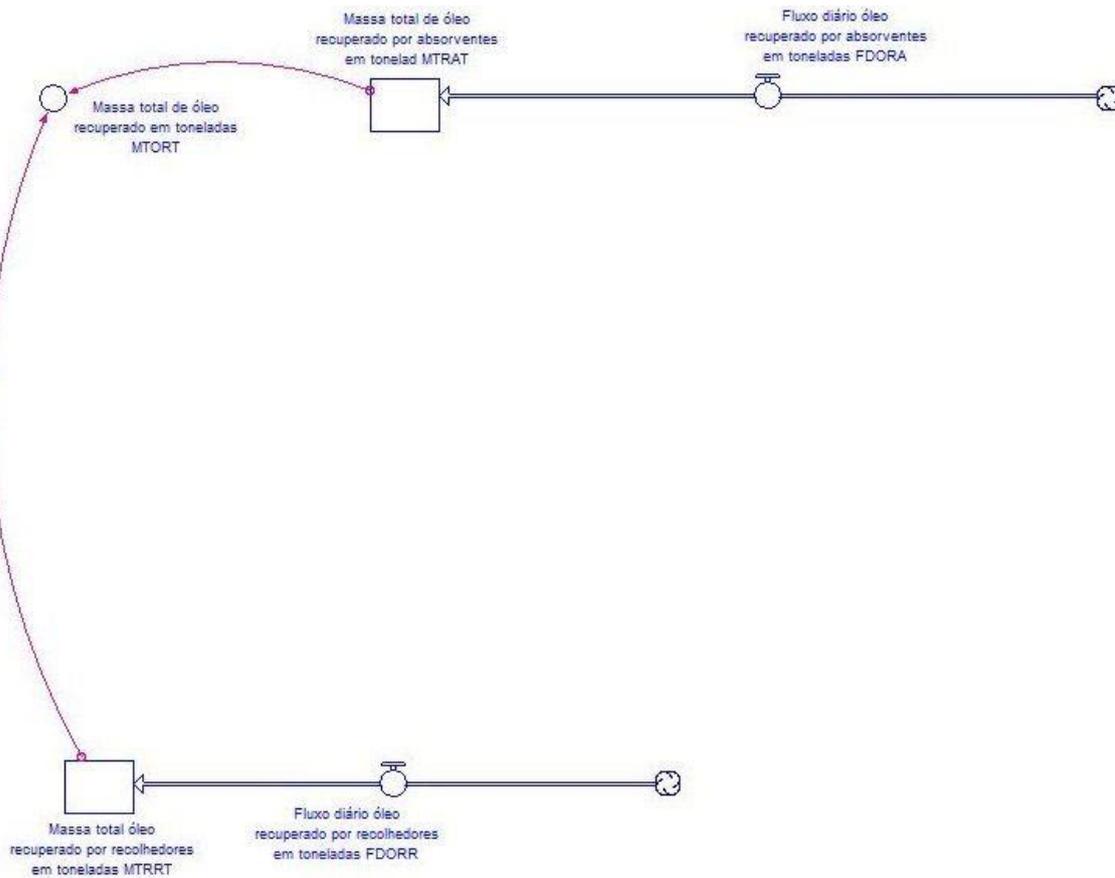


Figura 19: Massa total de óleo recuperado em toneladas (MTORT).

#### 5.1.5.1 MTORT: Massa total de óleo recuperado em toneladas.

$$MTORT = MTRAT + MTRRT$$

Equação 16: Massa total de óleo recuperado em toneladas.

$$\begin{aligned} MTORT &= 0,00 \text{ ton (valor inicial)} + 0,00 \text{ ton (valor inicial)} \\ &= 0,00 \text{ ton (valor inicial)} \end{aligned}$$

##### 5.1.5.1.1 MTRAT: Massa total de óleo recuperado por absorventes em toneladas.

$$MTRAT = 0,00 \text{ ton (valor inicial)}$$

Equação 11: Massa total de óleo recuperado por absorventes em toneladas.

### 5.1.5.1.2 MTRRT: Massa total de óleo recuperado por recolhedores em toneladas.

$$\text{MTRRT} = 0,00 \text{ ton (valor inicial)}$$

*Equação 15: Massa total de óleo recuperado por recolhedores em toneladas.*

*Tabela 15: Equações e valores referentes à massa total de óleo recuperado em toneladas (MTORT).*

CÓDIGO	ITEM	EQUAÇÃO OU VALOR	UNIDADE	FONTE
<b>MTORT</b>	Massa total de óleo recuperado em toneladas	$\text{MTORT} = \text{MTRAT} + \text{MTRRT}$	ton	Autor
<b>MTRAT</b>	Massa total de óleo recuperado por absorventes em toneladas	valor inicial = 0	ton	Autor <sup>17</sup>
<b>MTRRT</b>	Massa total óleo recuperado por recolhedores em toneladas	valor inicial = 0	ton	Autor <sup>18</sup>

## 5.2 EQUAÇÕES REFERENTES AO SUBMODELO DE RESÍDUOS SÓLIDOS OLEOSOS

O “Submodelo de resíduos sólidos oleosos” calcula as estimativas das massas dos resíduos sólidos descartados correspondentes às mantas e barreiras absorventes (FDRSA) bem como dos EPI’s contaminados por óleo (FDRSE) durante as operações de contenção e recolhimento do óleo superficial, formando dois distintos fluxos de resíduos sólidos oleosos contaminados. Assim como no “Submodelo de óleo recuperado”, a demonstração do modelo de geração de resíduos utilizou os quantitativos de materiais absorventes e EPI’s de acordo com o Plano de Emergência Individual do Sistema Definitivo (SD) do Campo de Atlanta, na Bacia de Santos, em seu Apêndice H (ENAUTA, 2021), já apresentados na Tabela 8. Os fluxos diários FDRSA e FDRSE respectivamente determinam o estoque MRSAB que corresponde à massa total de resíduos sólidos oleosos gerados por materiais absorventes e o estoque MRSEP que corresponde à massa total de resíduos sólidos oleosos gerados por EPI’s, cuja soma determina a massa total de resíduos sólidos oleosos (MTRST), em toneladas.

<sup>17</sup> O valor inicial fica ajustado em “0” em função de ser um estoque que recebe o valor calculado no fluxo “FDORA”.

<sup>18</sup> O valor inicial fica ajustado em “0” em função de ser um estoque que recebe o valor calculado no fluxo “MTRRT”.



absorventes (VOBAB) é apresentado em  $m^3$ , é necessária sua conversão para toneladas por meio de DOTM3. O fator duração da modelagem (DUMOD) transforma os montantes estimados de ROMAB e ROBAB a serem gerados durante o período da modelagem para um valor diário, correspondente ao fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de EPI's (FDRSA).

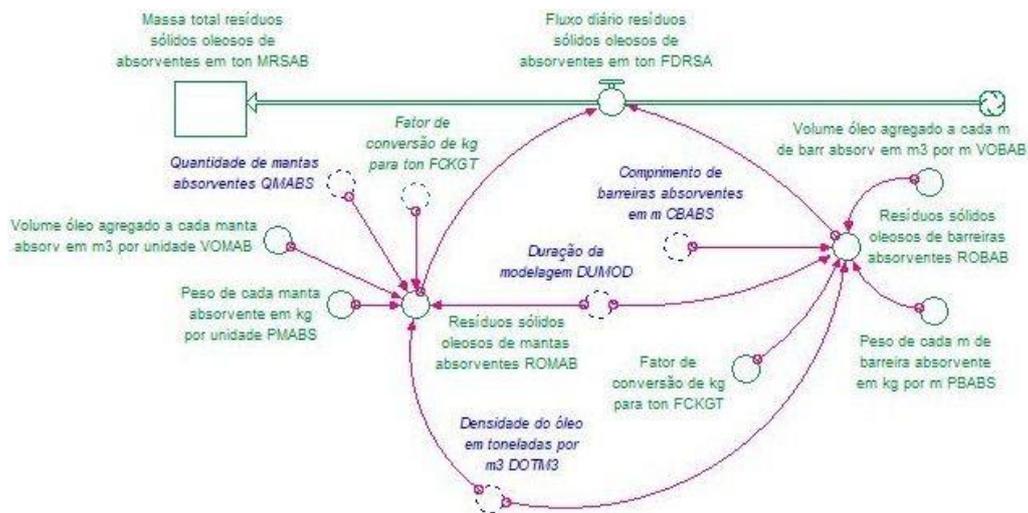


Figura 21: Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas (FDRSA).

### 5.2.1.1 FDRSA: Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas.

$$FDRSA = ROBAB + ROMAB$$

Equação 17: Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas.

$$FDRSA = \frac{0,11 \text{ ton}}{\text{dia}} + \frac{0 \text{ ton}}{\text{dia}} = \frac{0,11 \text{ ton}}{\text{dia}}$$

#### 5.2.1.1.1 DOTM3: Densidade do óleo em toneladas por $m^3$ .

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\text{densidade}} - 131,5 \Leftrightarrow DOTM3 = \frac{141,5}{GRAPI + 131,5}$$

Equação 4: Densidade do óleo em toneladas por  $m^3$ .

$$DOTM3 = \frac{141,5}{13,7 + 131,5} = \frac{0,97 \text{ ton}}{m^3}$$

### 5.2.1.1.2 ROMAB: Resíduos sólidos oleosos de mantas absorventes.

$$\text{ROMAB} = \frac{((\text{PMABS} \times \text{FCKGT}) + (\text{VOMAB} \times \text{DOTM3})) \times \text{QMABS}}{\text{DUMOD}}$$

*Equação 18: Resíduos sólidos oleosos de mantas absorventes.*

$$\begin{aligned} \text{ROMAB} &= \frac{\left( \left( \frac{0,75 \text{ kg}}{\text{unidade}} \times \frac{0,001 \text{ ton}}{\text{kg}} \right) + \left( \frac{0,0001 \text{ m}^3}{\text{unidade}} \times \frac{0,97 \text{ ton}}{\text{m}^3} \right) \right) \times 0 \text{ unidades}}{31 \text{ dias}} \\ &= \frac{0,00 \text{ ton}}{\text{dia}} \end{aligned}$$

### 5.2.1.1.3 ROBAB: Resíduos sólidos oleosos de barreiras absorventes.

$$\text{ROBAB} = \frac{((\text{PBABS} \times \text{FCKGT}) + (\text{VOBAB} \times \text{DOTM3})) \times \text{CBABS}}{\text{DUMOD}}$$

*Equação 19: Resíduos sólidos oleosos de barreiras absorventes.*

$$\text{ROBAB} = \frac{\left( \left( \frac{0,67 \text{ kg}}{\text{m}} \times \frac{0,001 \text{ ton}}{\text{kg}} \right) + \left( \frac{0,001 \text{ m}^3}{\text{m}} \times \frac{0,97 \text{ ton}}{\text{m}^3} \right) \right) \times 2.000 \text{ m}}{31 \text{ dias}} = \frac{0,11 \text{ ton}}{\text{dia}}$$

### 5.2.1.2 MRSAB: Massa total de resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas.

$$\text{MRSAB} = 0,00 \text{ ton (valor inicial)}$$

*Equação 20: Massa total de resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas.*

*Tabela 16: Equações e valores referentes aos resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas (FDRSA).*

CÓDIGO	ITEM	EQUAÇÃO OU VALOR	UNIDADE	FONTE
CBABS	Comprimento de barreiras absorventes em m	2000	m	ENAUTA, 2021 – Apêndice H
DOTM3	Densidade do óleo em toneladas por m <sup>3</sup>	$\text{DOTM3} = \frac{141,5}{\text{GRAPI} + 131,5}$	ton/m <sup>3</sup>	Autor

<b>DUMOD</b>	Duração da modelagem	31	dias	ENAUTA, 2022
<b>FCKGT</b>	Fator de conversão de kg para toneladas	0,001	ton/kg	Autor
<b>FDRSA</b>	Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas	$FDRSA = ROBAB + ROMAB$	ton/dia	Autor
<b>MRSAB</b>	Massa total resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas	valor inicial = 0	ton	Autor <sup>19</sup>
<b>PBABS</b>	Peso de cada m de barreira absorvente em kg por m	0,67	kg/m	Apêndice 1
<b>PMABS</b>	Peso de cada manta absorvente em kg por unidade	0,075	kg/unid.	Apêndice 1
<b>QMABS</b>	Quantidade de mantas absorventes <sup>20</sup>	0	unidade	Autor
<b>ROBAB</b>	Resíduos sólidos oleosos de barreiras absorventes	$ROBAB = \frac{((PBABS \times FCKGT) + (VOBAB \times DOTM3)) \times CBABS}{DUMOD}$	ton/dia	Autor
<b>ROMAB</b>	Resíduos sólidos oleosos de mantas absorventes	$ROMAB = \frac{((PMABS \times FCKGT) + (VOMAB \times DOTM3)) \times QMABS}{DUMOD}$	ton/dia	Autor
<b>VOBAB</b>	Volume de óleo agregado a cada m de barreira absorvente em m <sup>3</sup> por m	0,001 (1.000 ml)	m <sup>3</sup> /m	Autor <sup>21</sup>
<b>VOMAB</b>	Volume de óleo agregado	0,0001 (100 ml)	m <sup>3</sup> /unid.	Autor

<sup>19</sup> O valor inicial fica ajustado em “0” em função de ser um estoque que recebe o valor calculado em “FRSAB”.

<sup>20</sup> O valor “0” corresponde à ausência de previsão do uso de mantas absorventes conforme definido no Plano de Emergência Individual do Sistema Definitivo (SD) do Campo de Atlanta, na Bacia de Santos, em seu Apêndice H (ENAUTA, 2021).

<sup>21</sup> Considerando a falta de dados acadêmicos ou técnicos que definam esses volumes, os fatores “VOBAB”, “VOBOT”, “VOLUV”, “VOMAB” e “VOMAC” foram definidos de forma empírica, baseados na experiência pessoal do autor.

	a cada manta absorvente em m <sup>3</sup> por unidade			
--	---	--	--	--

### 5.2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS OLEOSOS DIÁRIOS GERADOS POR EPI (FDRSE)

O fluxo diário de EPI's contaminados (FDRSE) é formado pelo somatório dos resíduos sólidos oleosos de botas (ROBOT), luvas (ROLUV) e macacões (ROMAC), cada um dos quais formado por seus respectivos pesos (PBOTA, PLUVA e PMACC), quantidades (QBOTA, QLUVA e QMACC) e volumes de óleo agregado após a remoção dos excessos (VOBOT, VOLUV e VOMAC). Da mesma forma que no fluxo de materiais absorventes contaminados (FDRSA), foi utilizado o fator de conversão de kg para tonelada (FCKGT) uma vez que os pesos das botas (PBOTA), das luvas (PLUVA) e dos macacões (PMACC) são todos apresentados em kg e não em toneladas. Um fator importante no cômputo de FDRSE é a frequência com que os EPI's são trocados, o que é determinado por FRQTR, o que significa dizer que se a troca é feita a cada 2 dias, como ajustado no modelo, o volume de resíduos é a metade do valor calculado em ROBOT + ROLUV + ROMAC. Da mesma forma que em FDRSA, a conversão para toneladas por meio de DOTM3 foi utilizada, desta vez para converter o óleo agregado à VOBOT, VOLUV e VOMAC de m<sup>3</sup> para toneladas. O fator duração da modelagem (DUMOD) transforma o montante estimado de resíduos sólidos oleosos a serem gerados durante o período da modelagem para um valor diário, correspondente ao fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de EPI's (FDRSE).

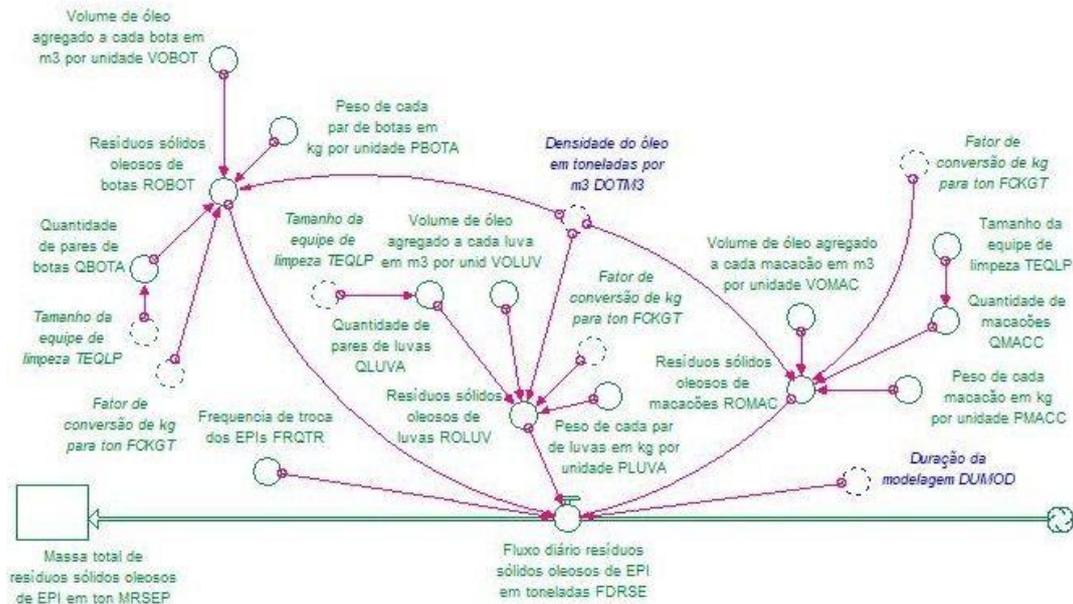


Figura 22: Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas (FDRSE).

### 5.2.2.1 FDRSE: Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas.

$$FDRSE = \frac{\left( \frac{ROBOT + ROLUV + ROMAC}{FRQTR} \right)}{DUMOD}$$

Equação 21: Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas.

$$FDRSE = \frac{\left( \frac{0,074 \text{ ton} + 0,016 \text{ ton} + 0,007 \text{ ton}}{2} \right)}{31 \text{ dias}} = \frac{0,0016 \text{ ton}}{\text{dia}}$$

#### 5.2.2.1.1 DOTM3: Densidade do óleo em toneladas por m<sup>3</sup>.

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\text{densidade}} - 131,5 \Leftrightarrow DOTM3 = \frac{141,5}{GRAPI + 131,5}$$

Equação 4: Densidade do óleo em toneladas por m<sup>3</sup>.

$$DOTM3 = \frac{141,5}{13,7 + 131,5} = \frac{0,97 \text{ ton}}{\text{m}^3}$$

**5.2.2.1.2 ROBOT: Resíduos sólidos oleosos de botas.**

$$\text{ROBOT} = ((\text{PBOTA} \times \text{FCKGT}) + (\text{VOBOT} \times \text{DOTM3})) \times \text{QBOTA}$$

*Equação 22: Resíduos sólidos oleosos de botas.*

$$\begin{aligned} \text{ROBOT} &= \left( \left( \frac{1,6 \text{ kg}}{\text{unidade}} \times \frac{0,001 \text{ ton}}{\text{kg}} \right) + \left( \frac{0,00001 \text{ m}^3}{\text{unidade}} \times \frac{0,97 \text{ ton}}{\text{m}^3} \right) \right) \times 46 \text{ unidades} \\ &= 0,074 \text{ ton} \end{aligned}$$

**5.2.2.1.2.1 QBOTA: Quantidade de pares de botas.**

$$\text{QBOTA} = \text{TEQLP}$$

*Equação 23: Quantidade de pares de botas.*

$$\text{QBOTA} = 46 \text{ unidades}$$

**5.2.2.1.3 ROLUV: Resíduos sólidos oleosos de luvas.**

$$\text{ROLUV} = ((\text{PLUVA} \times \text{FCKGT}) + (\text{VOLUV} \times \text{DOTM3})) \times \text{QLUVA}$$

*Equação 24: Resíduos sólidos oleosos de luvas.*

$$\begin{aligned} \text{ROLUV} &= \left( \left( \frac{0,329 \text{ kg}}{\text{unidade}} \times \frac{0,001 \text{ ton}}{\text{kg}} \right) + \left( \frac{0,00001 \text{ m}^3}{\text{unidade}} \times \frac{0,97 \text{ ton}}{\text{m}^3} \right) \right) \times 46 \text{ unidades} \\ &= 0,016 \text{ ton} \end{aligned}$$

**5.2.2.1.3.1 QLUVA: Quantidade de pares de luvas.**

$$\text{QLUVA} = \text{TEQLP}$$

*Equação 25: Quantidade de pares de luvas.*

$$\text{QLUVA} = 46 \text{ unidades}$$

#### 5.2.2.1.4 ROMAC: Resíduos sólidos oleosos de macacões.

$$\text{ROMAC} = ((\text{PMACC} \times \text{FCKGT}) + (\text{VOMAC} \times \text{DOTM3})) \times \text{QMACC}$$

*Equação 26: Resíduos sólidos oleosos de macacões.*

$$\begin{aligned} \text{ROMAC} &= \left( \left( \frac{0,11 \text{ kg}}{\text{unidade}} \times \frac{0,001 \text{ ton}}{\text{kg}} \right) + \left( \frac{0,00005 \text{ m}^3}{\text{unidade}} \times \frac{0,97 \text{ ton}}{\text{m}^3} \right) \right) \times 46 \text{ unidades} \\ &= 0,007 \text{ ton} \end{aligned}$$

#### 5.2.2.1.4.1 QMACC: Quantidade de macacões.

$$\text{QMACC} = \text{TEQLP}$$

*Equação 27: Quantidade de macacões.*

$$\text{QMACC} = 46 \text{ unidades}$$

#### 5.2.2.2 MRSEP: Massa total de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas.

$$\text{MRSEP} = 0,00 \text{ ton (valor inicial)}$$

*Equação 28: Massa total de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas.*

*Tabela 17: Equações e valores referentes aos resíduos sólidos oleosos de EPI's em toneladas (FDRSE).*

CÓDIGO	ITEM	EQUAÇÃO OU VALOR	UNIDADE	FONTE
<b>DOTM3</b>	Densidade do óleo em toneladas por m <sup>3</sup>	$\text{DOTM3} = \frac{141,5}{\text{GRAPI} + 131,5}$	ton/m <sup>3</sup>	Autor
<b>DUMOD</b>	Duração da modelagem	31	dias	ENAUTA, 2022
<b>FCKGT</b>	Fator de conversão de kg para toneladas	0,001	ton/kg	Autor
<b>FDRSE</b>	Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas	$\text{FDRSE} = \frac{(\text{ROBOT} + \text{ROLUV} + \text{ROMAC})}{\text{FRQTR}}$ $= \frac{\quad}{\text{DUMOD}}$	ton/dia	Autor

<b>FRQTR</b>	Frequência de troca dos EPIs	2	dias	Autor <sup>22</sup>
<b>MRSEP</b>	Massa total de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas	valor inicial = 0	ton	Autor <sup>23</sup>
<b>PBOTA</b>	Peso de cada par de botas em kg por unidade	1,6	kg/unid.	Apêndice 2
<b>PLUVA</b>	Peso de cada par de luvas em kg por unidade	0,329	kg/unid.	Apêndice 4
<b>PMACC</b>	Peso de cada macacão em kg por unidade	0,11	kg/unid.	Apêndice 3
<b>QBOTA</b>	Quantidade de pares de botas	$QBOTA = TEQLP$	unidade	Autor
<b>QLUVA</b>	Quantidade de pares de luvas	$QLUVA = TEQLP$	unidade	Autor
<b>QMACC</b>	Quantidade de macacões	$QMACC = TEQLP$	unidade	Autor
<b>ROBOT</b>	Resíduos sólidos oleosos de botas	$ROBOT = ((PBOTA \times FCKGT) + (VOBOT \times DOTM3)) \times QBOTA$	ton	Autor
<b>ROLUV</b>	Resíduos sólidos oleosos de luvas	$ROLUV = ((PLUVA \times FCKGT) + (VOLUV \times DOTM3)) \times QLUVA$	ton	Autor
<b>ROMAC</b>	Resíduos sólidos oleosos de macacões	$ROMAC = ((PMACC \times FCKGT) + (VOMAC \times DOTM3)) \times QMACC$	ton	Autor
<b>TEQLP</b>	Tamanho da equipe de limpeza <sup>24</sup>	46	unidade	Apêndice 5
<b>VOBOT</b>	Volume de óleo agregado a cada bota em m <sup>3</sup> por unidade	0,00001 (10 mL)	m <sup>3</sup> /unid.	Autor
<b>VOLUV</b>	Volume de óleo agregado a	0,00001 (10 mL)	m <sup>3</sup> /unid.	Autor

<sup>22</sup> A efetiva frequência de troca de EPI's é fator bastante subjetivo, dependente do grau de contaminação dos equipamentos, podendo variar bastante entre o pessoal envolvido nas operações de limpeza de acordo com suas ações nas operações de resposta.

<sup>23</sup> O valor inicial fica ajustado em "0" em função de ser um estoque que recebe o valor calculado em "FRSEP".

<sup>24</sup> O tamanho da equipe de limpeza pode variar bastante, indo desde apenas uma parte da tripulação das embarcações envolvidas nas operações de resposta até mesmo a milhares de voluntários quando o óleo chega até a costa. No caso do modelo ora apresentado, em que o óleo recuperado é específico de sua fração flutuante, o valor adotado no modelo corresponde a 80% das tripulações das embarcações PSV e AHTS de atendimento a emergências de vazamentos de óleo no mar citadas na Tabela 7, previstas no Plano de Emergência Individual do Sistema Definitivo (SD) do Campo de Atlanta, na Bacia de Santos.

	cada luva em m <sup>3</sup> por unidade			
<b>VOMAC</b>	Volume de óleo agregado a cada macacão em m <sup>3</sup> por unidade	0,00005 (50 mL)	m <sup>3</sup> /unid.	Autor

### 5.2.3 MASSA TOTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS OLEOSOS EM TONELADAS (MTRST)

Os fluxos diários de resíduos sólidos oleosos de absorventes (FDRSA) e EPI's (FDRSE) são transferidos ao longo de toda a duração da simulação (DUMOD), aos estoques MRSAB e MRSEP que iniciam a simulação com valores iniciais = 0,00, fazendo com que seus valores ao final da simulação correspondam à massa total de resíduos sólidos oleosos de absorventes (MRSAB) e à massa total de resíduos sólidos oleosos de EPI (MRSEP). Observe-se que não ocorre a conversão de m<sup>3</sup> para toneladas, visto que as massas de óleo em MRSAB e MRSEP já são apresentadas em toneladas. Por último, as massas de óleo recuperado expressas em MRSAB e MRSEP são somadas, gerando a massa total de resíduos sólidos oleosos em toneladas (MTRST), o que finaliza o "Submodelo de resíduos sólidos oleosos".

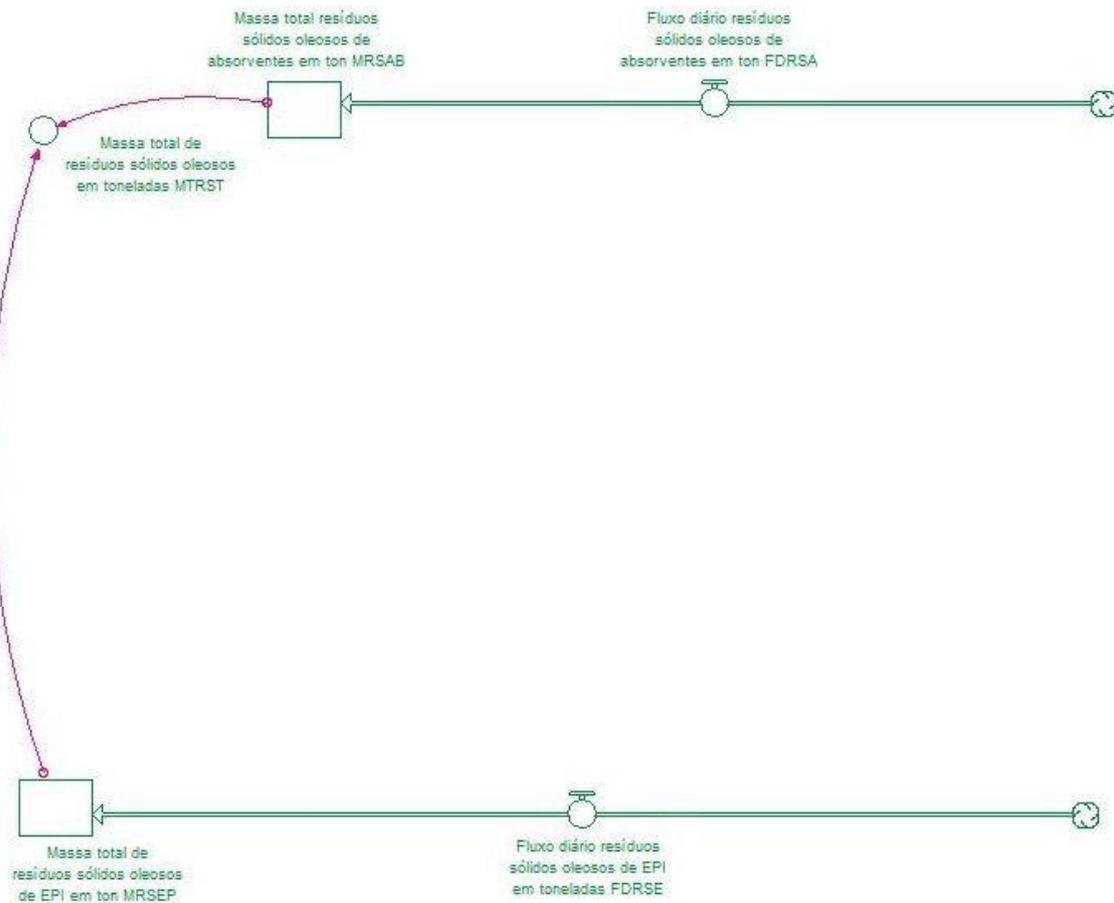


Figura 23: Massa total de resíduos sólidos oleosos em toneladas (MTRST).

### 5.2.3.1 MTRST: Massa total de resíduos sólidos oleosos em toneladas.

$$MTRST = MRSAB + MRSEP$$

Equação 29: Massa total de resíduos sólidos oleosos em toneladas.

$$\begin{aligned} MTRST &= 0,00 \text{ ton (valor inicial)} + 0,00 \text{ ton (valor inicial)} \\ &= 0,00 \text{ ton (valor inicial)} \end{aligned}$$

#### 5.2.3.1.1 MRSAB: Massa total de resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas.

$$MRSAB = 0,00 \text{ ton (valor inicial)}$$

Equação 20: Massa total de resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas.

### 5.2.3.1.2 MRSEP: Massa total de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas.

$$\text{MRSEP} = 0,00 \text{ ton (valor inicial)}$$

*Equação 28: Massa total de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas.*

*Tabela 18: Equações e valores referentes à massa total de resíduos sólidos oleosos em toneladas (MTRST).*

CÓDIGO	ITEM	EQUAÇÃO OU VALOR	UNIDADE	FONTE
<b>FDRSA</b>	Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas	$\text{FDRSA} = \text{ROBAB} + \text{ROMAB}$	ton/dia	Autor
<b>FDRSE</b>	Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas	$\text{FDRSE} = \frac{(\text{ROBOT} + \text{ROLUV} + \text{ROMAC})}{\text{FRQTR}}$ $= \frac{\quad}{\text{DUMOD}}$	ton/dia	Autor
<b>MRSAB</b>	Massa total resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas	valor inicial = 0	ton	Autor <sup>25</sup>
<b>MRSEP</b>	Massa total de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas	valor inicial = 0	ton	Autor <sup>26</sup>
<b>MTRST</b>	Massa total de resíduos sólidos oleosos em toneladas	$\text{MTRST} = \text{MRSAB} + \text{MRSEP}$	ton	Autor

<sup>25</sup> O valor inicial fica ajustado em "0" em função de ser um estoque que recebe o valor calculado em "FRSAB".

<sup>26</sup> O valor inicial fica ajustado em "0" em função de ser um estoque que recebe o valor calculado em "FRSEP".

### 5.3 EQUAÇÕES REFERENTES AO SUBMODELO DE ÁGUA OLEOSA

O “Submodelo de água oleosa” calcula as estimativas das massas de água oleosa gerada skimmers (AOGSK) e current-busters (AOGCB), as quais formam o fluxo diário de água oleosa gerada por recolhedores (FDAOR) bem como da descontaminação (lavagem) das embarcações utilizadas na contenção e recolhimento do óleo (AOEMB), dos EPI’s descartados contaminados por óleo (AOEPI), dos skimmers (AOSKI), dos current-busters (AOLCB), das barreiras oceânicas (AOBOC), dos tanques das embarcações (AOTQE) e dos tanques temporários (AOTQT) utilizados durante as operações de contenção e recolhimento do óleo superficial, as quais formam o fluxo diário de água oleosa gerada por descontaminação (FDAOD). Assim como no “Submodelo de óleo recuperado”, e no “Submodelo de resíduos sólidos oleosos”, a demonstração do modelo de geração de resíduos utilizou os quantitativos de EPI’s, equipamentos e embarcações de acordo com o Plano de Emergência Individual do Sistema Definitivo (SD) do Campo de Atlanta, na Bacia de Santos, em seu Apêndice H (ENAUTA, 2021), já apresentados na Tabela 8. Os fluxos diários FDAOR e FDAOD respectivamente determinam o estoque MTAST que corresponde à massa total de água oleosa gerada por recolhedores e o estoque MTADT que corresponde à massa total de água oleosa gerada por descontaminação. A soma dos estoques MTAST e MTADT gera a massa total de água oleosa (MTAOT), em toneladas.

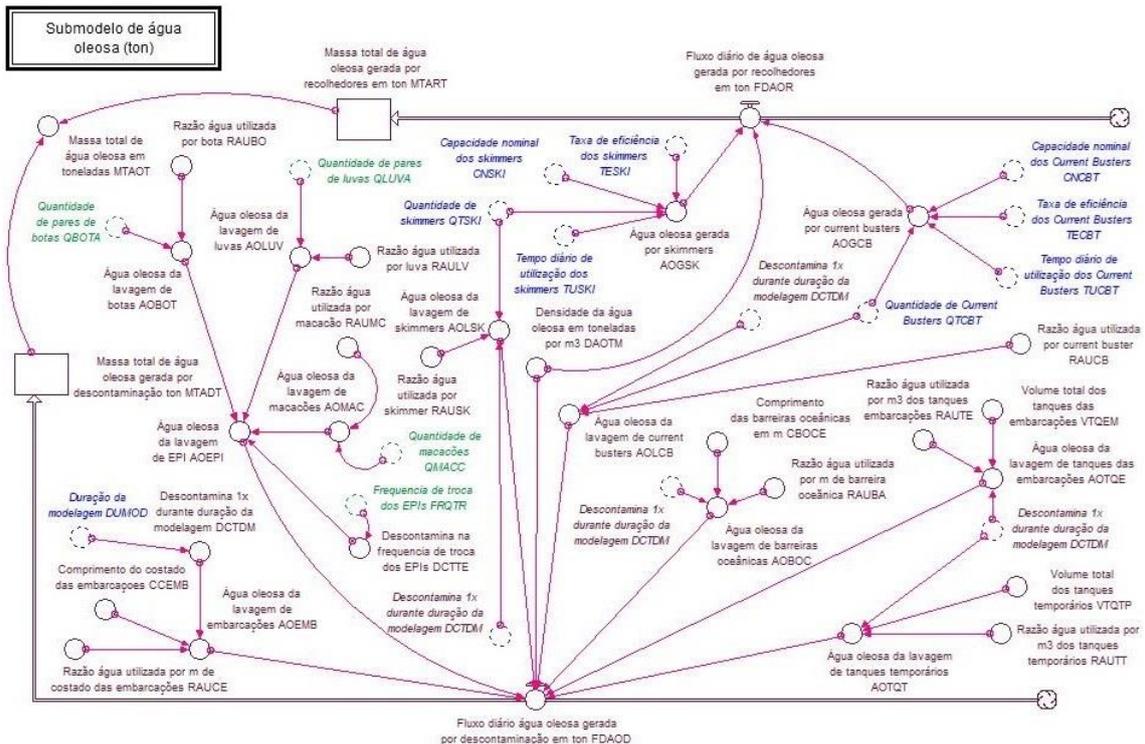


Figura 24: Submodelo de estimativa da massa total de água oleosa em toneladas (MTAOT).

### 5.3.1 ÁGUA OLEOSA DIÁRIA GERADA POR RECOLHEDORES (FDAOR)

O fluxo diário de água oleosa gerada por coletores (FDAOR) é formado pelo produto entre a densidade da água oleosa em ton/m<sup>3</sup> (DAOTM) e o somatório da água oleosa gerada por skimmers (AOGSK) e da água oleosa gerada por current busters (AOGCB), cada qual formada por suas respectivas capacidades nominais (CNSKI e CNCBT), por suas taxas de eficiência (TESKI e TECBT), quantidade (QTSKI e QTCBT) e tempo diário de uso (TUSKI e TECBT).

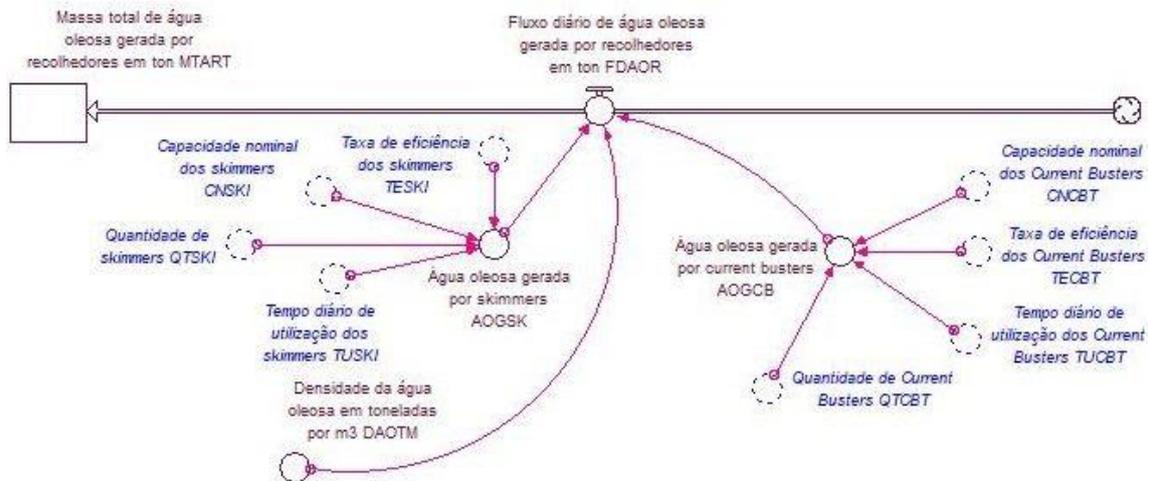


Figura 25: Fluxo diário de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas (FDAOR).

### 5.3.1.1 FDAOR: Fluxo diário de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas.

$$\text{FDAOR} = (\text{AOGCB} + \text{AOGSK}) \times \text{DAOTM}$$

Equação 30: Fluxo diário de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas.

$$\text{FDAOR} = \left( \frac{1.440,00 \text{ m}^3}{\text{dia}} + \frac{3.360,00 \text{ m}^3}{\text{dia}} \right) \times \frac{1,082 \text{ ton}}{\text{m}^3} = \frac{5.193,60 \text{ ton}}{\text{dia}}$$

#### 5.3.1.1.1 AOGSK: Água oleosa gerada por skimmers.

$$\text{AOGSK} = (1 - \text{TESKI}) \times \text{CNSKI} \times \text{QTSKI} \times \text{TUSKI}$$

Equação 31: Água oleosa gerada por skimmers.

$$\text{AOGSK} = \left( 1 - \frac{20}{100} \right) \times \frac{350 \text{ m}^3}{\text{h}} \times 1 \times \frac{12 \text{ h}}{\text{dia}} = \frac{3.360,00 \text{ m}^3}{\text{dia}}$$

#### 5.3.1.1.2 AOGCB: Água oleosa gerada por Current Busters.

$$\text{AOGCB} = (1 - \text{TECBT}) \times \text{CNCBT} \times \text{QTCBT} \times \text{TUCBT}$$

Equação 32: Água oleosa gerada por Current Busters.

$$\text{AOGCB} = \left( 1 - \frac{70}{100} \right) \times \frac{200 \text{ m}^3}{\text{h}} \times 2 \times \frac{12 \text{ h}}{\text{dia}} = \frac{1.440,00 \text{ m}^3}{\text{dia}}$$

### 5.3.1.2 MTART: Massa total de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas.

$$MTART = 0,00 \text{ ton (valor inicial)}$$

*Equação 33: Massa total de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas.*

*Tabela 19: Equações e valores referentes à água oleosa gerada por recolhedores em toneladas (FDAOR).*

CÓDIGO	ITEM	EQUAÇÃO OU VALOR	UNIDADE	FONTE
<b>AOGCB</b>	Água oleosa gerada por Current Busters	$AOGCB = (1 - TECBT) \times CNCBT \times QTCBT \times TUCBT$	m <sup>3</sup> /dia	Autor
<b>AOGSK</b>	Água oleosa gerada por skimmers	$AOGSK = (1 - TESKI) \times CNSKI \times QTSKI \times TUSKI$	m <sup>3</sup> /dia	Autor
<b>CNCBT</b>	Capacidade nominal dos Current Busters	200	m <sup>3</sup> /h	ENAUTA, 2021 – Apêndice H
<b>CNSKI</b>	Capacidade nominal dos skimmers	350	m <sup>3</sup> /h	ENAUTA, 2021 – Apêndice H
<b>DAOTM</b>	Densidade <sup>27</sup> da água oleosa em toneladas por m <sup>3</sup>	1,082	ton/m <sup>3</sup>	ENAUTA 2022, Quadro II.2-17
<b>FDAOR</b>	Fluxo diário de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas	$FDAOR = (AOGCB + AOGSK) \times DAOTM$	ton/dia	Autor
<b>MTART</b>	Massa total de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas	Valor inicial = 0	ton	Autor <sup>28</sup>
<b>QTCBT</b>	Quantidade de current busters	2	unidade	ENAUTA, 2021 – Apêndice H
<b>QTSKI</b>	Quantidade de skimmers	1	unidade	ENAUTA, 2021 – Apêndice H

<sup>27</sup> A densidade da água oleosa que se forma durante um vazamento de petróleo é bastante variável, estando sujeita à sua composição original e a diversos processos de intemperismo do óleo, que alteram sua concentração. Na ausência de um valor determinado, foi adotado como limiar mínimo o valor da densidade da água de produção do Campo de Atlanta (ENAUTA 2022, Quadro II.2-17).

<sup>28</sup> O valor inicial fica ajustado em “0” em função de ser um estoque que recebe o valor calculado em “FDAOR”.

<b>TUCBT</b>	Tempo diário de utilização dos Current Busters	12	h	Autor <sup>29</sup>
<b>TUSKI</b>	Tempo diário de utilização dos skimmers	12	h	Autor

### 5.3.2 ÁGUA OLEOSA DIÁRIA GERADA POR DESCONTAMINAÇÃO (FDAOD)

O fluxo diário de água oleosa gerada por descontaminação (FDAOD) é formado pelo somatório dos volumes de água oleosa da lavagem de embarcações (AOEMB), da água oleosa da lavagem de EPI's (AOEPI), a qual é formada pelo somatório da água oleosa da lavagem de botas (AOBOT), da água oleosa da lavagem de luvas (AOLUV) e da água oleosa da lavagem de macacões (AOMAC), da água oleosa da lavagem de skimmers (AOLSKI), da água oleosa da lavagem de current busters (AOLCB), da água oleosa da lavagem de barreiras oceânicas (AOBOC), da água oleosa da lavagem de tanques das embarcações (AOTQE) e da água oleosa da lavagem dos tanques temporários (AOTQT). Cada tipo de EPI, de equipamento ou embarcação exige uma determinada quantidade de água para sua descontaminação, e por consequência gera um determinado volume de água oleosa que é gerada de acordo com sua quantidade, como é o caso dos EPI's, dos skimmers e dos current busters, como é o caso do comprimento das barreiras oceânicas e do costado das embarcações e de volumes, como é o caso dos tanques das embarcações e tanques temporários. Para os EPI's, são utilizadas a razão água utilizada por bota<sup>30</sup> (RAUBO), a razão água utilizada por luva<sup>31</sup> (RAULV), a razão água utilizada por macacão (RAUMC), e suas respectivas quantidades quantidade de pares de botas (QBOTA), quantidade de pares de luvas (QLUVA) e quantidade de macacões (QMACC). Para os skimmers e os current busters, são utilizadas a razão água utilizada por skimmer (RAUSK) e a razão água utilizada por current buster (RAUCB), e suas respectivas quantidades quantidade de skimmers (QTSKI) e quantidade de current busters (QTCBT). Para as barreiras oceânicas e as embarcações, são utilizadas a razão água utilizada por

<sup>29</sup> No Plano de Emergência Individual do Sistema Definitivo (SD) do Campo de Atlanta, não consta essa informação. O valor de 12 horas diárias de uso dos skimmers e current busters foi estipulado pelo autor com base no tempo médio de luz solar, período considerado seguro para esse tipo de operação.

<sup>30</sup> A quantidade de botas (QBOTA) considera o par de botas.

<sup>31</sup> A quantidade de de luvas (QLUVA) considera o par de luvas.

m de barreira oceânica (RAUBA) e a razão água utilizada por m de costado da embarcação (RAUCE), e seus respectivos comprimentos comprimento das barreiras oceânicas em m (CBOCE) e comprimento do costado das embarcações em metros (CCEMB). Por último, para os tanques das embarcações são utilizadas a razão água utilizada por m<sup>3</sup> dos tanques das embarcações (RAUTE) e a razão água utilizada por m<sup>3</sup> dos tanques temporários (RAUTT), e seus respectivos volumes volume total dos tanques das embarcações (VTQEM) e volume total dos tanques temporários (VTQTP). Além desses, outros fatores que interferem no cômputo do fluxo diário de água oleosa gerada por descontaminação (FDAOD) são a frequência com que é feita a descontaminação, o que implica no volume de água oleosa gerado. No caso dos EPI's, a descontaminação ocorre na frequência de troca de troca dos EPI's (FRQTR), o que implica no fator descontamina na frequência de troca dos EPI's (DCTTE). No caso das embarcações, dos skimmers, dos current busters, das barreiras oceânicas, dos tanques das embarcações e dos tanques temporários, a descontaminação ocorre apenas ao final das operações de contenção e recolhimento do óleo, o que implica no fator descontamina 1x durante duração da modelagem (DCTDM). Por último, considerando que os dados utilizados até aqui estabelecem o volume em m<sup>3</sup> da água oleosa, faz-se necessário o uso do fator densidade da água oleosa em toneladas por m<sup>3</sup> (DAOTM) para fazer a conversão do volume em m<sup>3</sup> para massa em toneladas no fluxo diário de água oleosa gerada por descontaminação (FDAOD).

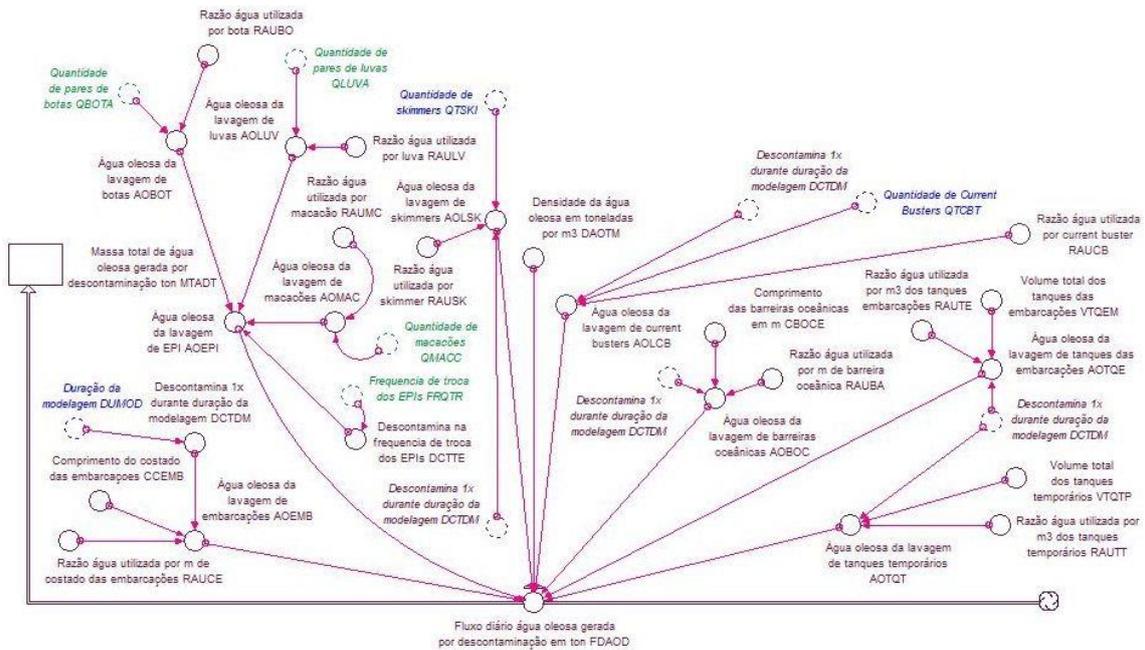


Figura 26: Fluxo diário de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas (FDAOD).

### 5.3.2.1 FDAOD: Fluxo diário de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas.

$$\text{FDAOD} = (\text{AOBOC} + \text{AOEMB} + \text{AOEPI} + \text{AOLCB} + \text{AOLSK} + \text{AOTQE} + \text{AOTQT}) \times \text{DAOTM}$$

Equação 34: Fluxo diário de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas.

$$\text{FDAOD} = \left( \frac{0,258 \text{ m}^3}{\text{dia}} + \frac{0,111 \text{ m}^3}{\text{dia}} + \frac{0,598 \text{ m}^3}{\text{dia}} + \frac{0,094 \text{ m}^3}{\text{dia}} + \frac{0,006 \text{ m}^3}{\text{dia}} + \frac{82,78 \text{ m}^3}{\text{dia}} + \frac{0,00 \text{ m}^3}{\text{dia}} \right) \times \frac{1,082 \text{ ton}}{\text{m}^3} = \frac{90,722 \text{ ton}}{\text{dia}}$$

#### 5.3.2.1.1 AOEMB: Água oleosa da lavagem de embarcações.

$$\text{AOEMB} = \text{CCEMB} \times \text{RAUCE} \times \text{DCTDM}$$

Equação 35: Água oleosa da lavagem de embarcações.

$$\text{AOEMB} = 346,5 \text{ m} \times \frac{0,01 \text{ m}^3}{\text{m}} \times \frac{1}{31 \text{ dias}} = \frac{0,111 \text{ m}^3}{\text{dia}}$$

**5.3.2.1.1.1 DCTDM: Descontamina 1x durante duração da modelagem.**

$$DCTDM = \frac{1}{DUMOD}$$

*Equação 36: Descontamina 1x durante duração da modelagem.*

$$DCTDM = \frac{1}{31 \text{ dias}}$$

**5.3.2.1.2 AOEPI: Água oleosa da lavagem de EPI.**

$$AOEPI = (AOBOT + AOLUV + AOMAC) \times DCTTE$$

*Equação 37: Água oleosa da lavagem de EPI.*

$$AOEPI = (0,345 \text{ m}^3 + 0,161 \text{ m}^3 + 0,69 \text{ m}^3) \times \frac{1}{2 \text{ dias}} = \frac{0,598 \text{ m}^3}{\text{dia}}$$

**5.3.2.1.2.1 AOBOT: Água oleosa da lavagem de botas.**

$$AOBOT = QBOTA \times RAUBO$$

*Equação 38: Água oleosa da lavagem de botas.*

$$AOBOT = 46 \text{ unidades} \times \frac{0,0075 \text{ m}^3}{\text{unidade}} = 0,345 \text{ m}^3$$

**5.3.2.1.2.2 AOLUV: Água oleosa da lavagem de luvas.**

$$AOLUV = QLUVA \times RAULV$$

*Equação 39: Água oleosa da lavagem de luvas.*

$$AOLUV = 46 \text{ unidades} \times \frac{0,0035 \text{ m}^3}{\text{unidade}} = 0,161 \text{ m}^3$$

**5.3.2.1.2.3 AOMAC: Água oleosa da lavagem de macacões.**

$$AOMAC = QMACC \times RAUMC$$

*Equação 40: Água oleosa da lavagem de macacões.*

$$AOMAC = 46 \text{ unidades} \times \frac{0,015 \text{ m}^3}{\text{unidade}} = 0,69 \text{ m}^3$$

**5.3.2.1.2.4 DCTTE: Descontamina na frequência de troca dos EPIs.**

$$DCTTE = \frac{1}{FRQTR}$$

*Equação 41: Descontamina na frequência de troca dos EPIs.*

$$DCTTE = \frac{1}{2 \text{ dias}}$$

**5.3.2.1.3 AOLSK: Água oleosa da lavagem de skimmers.**

$$AOLSK = QTSKI \times RAUSK \times DCTDM$$

*Equação 42: Água oleosa da lavagem de skimmers.*

$$AOLSK = 1 \text{ unidade} \times \frac{0,2 \text{ m}^3}{\text{unidade}} \times \frac{1}{31 \text{ dias}} = \frac{0,006 \text{ m}^3}{\text{dia}}$$

**5.3.2.1.4 AOLCB: Água oleosa da lavagem de current busters.**

$$AOLCB = QTCBT \times RAUCB \times DCTDM$$

*Equação 43: Água oleosa da lavagem de current busters.*

$$AOLCB = 2 \text{ unidades} \times \frac{1,458 \text{ m}^3}{\text{unidade}} \times \frac{1}{31 \text{ dias}} = \frac{0,094 \text{ m}^3}{\text{dia}}$$

### 5.3.2.1.5 AOBOC: Água oleosa da lavagem de barreiras oceânicas.

$$\text{AOBOC} = \text{CBOCE} \times \text{RAUBA} \times \text{DCTDM}$$

*Equação 44: Água oleosa da lavagem de barreiras oceânicas.*

$$\text{AOBOC} = 800 \text{ m} \times \frac{0,01 \text{ m}^3}{\text{m}} \times \frac{1}{31 \text{ dias}} = \frac{0,258 \text{ m}^3}{\text{dia}}$$

### 5.3.2.1.6 AOTQE: Água oleosa da lavagem de tanques das embarcações.

$$\text{AOTQE} = \text{VTQEM} \times \text{RAUTE} \times \text{DCTDM}$$

*Equação 45: Água oleosa da lavagem de tanques das embarcações.*

$$\text{AOTQE} = 2.138,50 \text{ m}^3 \times \frac{1,2 \text{ m}^3}{\text{m}^3} \times \frac{1}{31 \text{ dias}} = \frac{82,78 \text{ m}^3}{\text{dia}}$$

### 5.3.2.1.7 AOTQT: Água oleosa da lavagem de tanques temporários.

$$\text{AOTQT} = \text{VTQTP} \times \text{RAUTT} \times \text{DCTDM}$$

*Equação 46: Água oleosa da lavagem de tanques temporários*

$$\text{AOTQT} = 0,00 \text{ m}^3 \times \frac{1,2 \text{ m}^3}{\text{m}^3} \times \frac{1}{31 \text{ dias}} = \frac{0,00 \text{ m}^3}{\text{dia}}$$

### 5.3.2.2 MTADT: Massa total de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas.

$$\text{MTADT} = 0,00 \text{ ton (valor inicial)}$$

*Equação 47: Massa total de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas.*

*Tabela 20: Equações e valores referentes à água oleosa gerada por descontaminação em toneladas (FDAOD).*

CÓDIGO	ITEM	VALOR	UNID.	FONTE
<b>AOBOC</b>	Água oleosa da lavagem de barreiras oceânicas	$\text{AOBOC} =$ $= \text{CBOCE} \times \text{RAUBA} \times \text{DCTDM}$	m <sup>3</sup> /dia	Autor

<b>AOBOT</b>	Água oleosa da lavagem de botas	$AOBOT = QBOTA \times RAUBO$	m <sup>3</sup>	Autor
<b>AOEMB</b>	Água oleosa da lavagem de embarcações	$AOEMB =$ $= CCEMB \times RAUCE \times DCTDM$	m <sup>3</sup> /dia	Autor
<b>AOEPI</b>	Água oleosa da lavagem de EPI	$AOEPI =$ $= (AOBOT + AOLUV$ $+ AOMAC) \times DCTTE$	m <sup>3</sup> /dia	Autor
<b>AOLCB</b>	Água oleosa da lavagem de Current Busters	$AOLCB =$ $= QTCBT \times RAUCB \times DCTDM$	m <sup>3</sup> /dia	Autor
<b>AOLSK</b>	Água oleosa da lavagem de skimmers	$AOLSK =$ $= QTSKI \times RAUSK \times DCTDM$	m <sup>3</sup> /dia	Autor
<b>AOLUV</b>	Água oleosa da lavagem de luvas	$AOLUV = QLUVA \times RAULV$	m <sup>3</sup>	Autor
<b>AOMAC</b>	Água oleosa da lavagem de macacões	$AOMAC = QMACC \times RAUMC$	m <sup>3</sup>	Autor
<b>AOTQE</b>	Água oleosa da lavagem de tanques das embarcações	$AOTQE =$ $= VTQEM \times RAUTE \times DCTDM$	m <sup>3</sup> /dia	Autor
<b>AOTQT</b>	Água oleosa da lavagem de tanques temporários	$AOTQT =$ $= VTQTP \times RAUTT \times DCTDM$	m <sup>3</sup> /dia	Autor
<b>CBOCE</b>	Comprimento das barreiras oceânicas em m	800	m	ENAUTA, 2021 – Apêndice H
<b>CCEMB</b>	Comprimento do costado das embarcações	346,45	m	Tabela 7
<b>DAOTM</b>	Densidade <sup>32</sup> da água oleosa em toneladas por m <sup>3</sup>	1,082	ton/m <sup>3</sup>	ENAUTA 2022, Quadro II.2-17
<b>DCTDM</b>	Descontamina 1x durante duração da modelagem	$DCTDM = \frac{1}{DUMOD}$	dia	Autor

<sup>32</sup> A densidade da água oleosa que se forma durante um vazamento de petróleo é bastante variável, estando sujeita à sua composição original e a diversos processos de intemperismo do óleo, que alteram sua concentração. Na ausência de um valor determinado, foi adotado como limiar mínimo o valor da densidade da água de produção do Campo de Atlanta (ENAUTA 2022, Quadro II.2-17).

<b>DCTTE</b>	Descontamina na frequência de troca dos EPIs	$DCTTE = \frac{1}{FRQTR}$	dia	Autor
<b>DUMOD</b>	Duração da modelagem	31	dia	ENAUTA, 2022
<b>FDAOD</b>	Fluxo diário de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas	FDAOD = = (AOBOC + AOLCB + AOEMB + AOEPI + AOLSK + AOTQE + AOTQT) x DAOTM	ton/dia	Autor
<b>FRQTR</b>	Frequência de troca dos EPIs	2	dia	Autor
<b>MTADT</b>	Massa total de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas	Valor inicial = 0	ton	Autor <sup>33</sup>
<b>QBOTA</b>	Quantidade de pares de botas	46	Unidade	= TEQLP
<b>QLUVA</b>	Quantidade de pares de luvas	46	unidade	= TEQLP
<b>QMACC</b>	Quantidade de macacões	46	unidade	= TEQLP
<b>QTCBT</b>	Quantidade de Current Busters	2	unidade	ENAUTA, 2021 – Apêndice H
<b>QTSKI</b>	Quantidade de skimmers	1	unidade	ENAUTA, 2021 – Apêndice H
<b>RAUBA</b>	Razão água utilizada por m de barreira oceânica	0,01	m <sup>3</sup> /m	Autor e AlBriggs
<b>RAUCB</b>	Razão água utilizada por Current Buster	Current Buster 2: 0,744 Current Buster 4: 0,904 Current Buster 6: 1,458	m <sup>3</sup> /un.	Autor e AlBriggs
<b>RAUCE</b>	Razão água utilizada por m de costado das embarcações	0,01	m <sup>3</sup> /m	Autor
<b>RAUBO</b>	Razão água utilizada por bota	0,0075	m <sup>3</sup> /un.	Autor, ProtCap, Delta Pluss e LavEPI

<sup>33</sup> O valor inicial fica ajustado em “0” em função de ser um estoque que recebe o valor calculado em “FDAOD”.

<b>RAULV</b>	Razão água utilizada por luva	0,0035	m <sup>3</sup> /un.	Autor, ProtCap, Delta Pluss e LavEPI
<b>RAUMC</b>	Razão água utilizada por macacão	0,015	m <sup>3</sup> /un.	Autor, ProtCap, Delta Pluss e LavEPI
<b>RAUSK</b>	Razão água utilizada por skimmer	0,2	m <sup>3</sup> /un.	Autor e AlBriggs
<b>RAUTE</b>	Razão água utilizada por m <sup>3</sup> dos tanques embarcações	1,2	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Autor e Tiger Rentank do Brasil
<b>RAUTT</b>	Razão água utilizada por m <sup>3</sup> dos tanques temporários	1,2	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	Autor e Tiger Rentank do Brasil
<b>VTQEM</b>	Volume total dos tanques das embarcações	2.138,5	m <sup>3</sup>	ENAUTA, 2021 – Apêndice H
<b>VTQTP</b>	Volume total dos tanques temporários	1.200,00	m <sup>3</sup>	Autor

### 5.3.3 MASSA TOTAL DE ÁGUA OLEOSA EM TONELADAS (MTAOT)

Os fluxos diários de água oleosa gerada por recolhedores (FDAOR) e por descontaminação (FDAOD) são transferidos ao longo de toda a duração da simulação (DUMOD), aos estoques MTART e MTADT que iniciam a simulação com valores iniciais = 0,00, fazendo com que seus valores ao final da simulação correspondam à massa total de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas (MTART) e à massa total de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas (MTADT). Observe-se que não ocorre a conversão de m<sup>3</sup> para toneladas, visto que as massas de óleo em MTART e MTADT já são apresentadas em toneladas. Por último, as massas de óleo recuperado expressas em MTART e MTADT são somadas, gerando a massa total de água oleosa em toneladas (MTRST), o que finaliza o “Submodelo de água oleosa”.

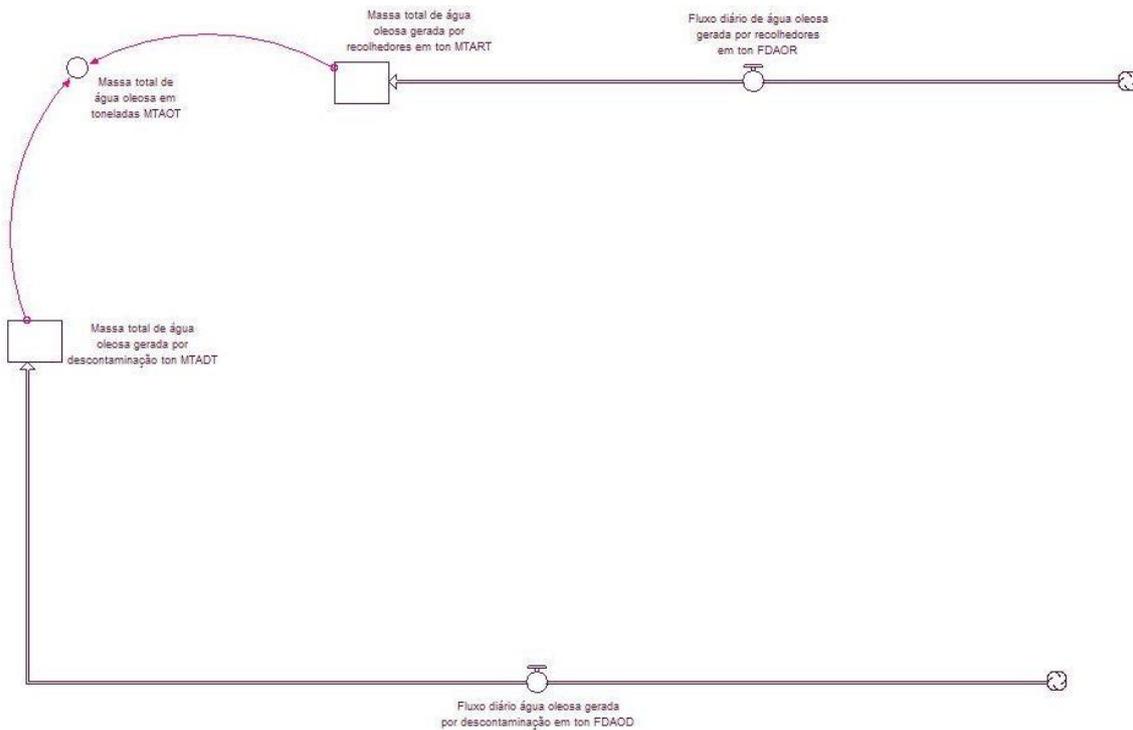


Figura 27: Massa total de água oleosa em toneladas.

### 5.3.3.1 MTAOT: Massa total de água oleosa em toneladas.

$$\text{MTAOT} = \text{MTADT} + \text{MTART}$$

Equação 48: Massa total de água oleosa em toneladas.

$$\begin{aligned} \text{MTAOT} &= 0,00 \text{ ton (valor inicial)} + 0,00 \text{ ton (valor inicial)} \\ &= 0,00 \text{ ton (valor inicial)} \end{aligned}$$

### 5.3.3.2 MTADT: Massa total de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas.

$$\text{MTADT} = 0,00 \text{ ton (valor inicial)}$$

Equação 47: Massa total de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas.

### 5.3.3.3 MTART: Massa total de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas.

$$MTART = 0,00 \text{ ton (valor inicial)}$$

*Equação 33: Massa total de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas.*

*Tabela 21: Equações e valores referentes à massa total de água oleosa em toneladas (MTAOT).*

CÓDIGO	ITEM	EQUAÇÃO OU VALOR	UNIDADE	FONTE
<b>FDAOD</b>	Fluxo diário de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas	$FDAOD =$ $= (AOBOC + AOLCB$ $+ AOEMB + AOEPI$ $+ AOLSK + AOTQE$ $+ AOTQT) \times DAOTM$	ton/dia	Autor
<b>FDAOR</b>	Fluxo diário de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas	$FDAOR =$ $= (AOGCB$ $+ AOGSK) \times DAOTM$	ton/dia	Autor
<b>MTADT</b>	Massa total de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas	Valor inicial = 0	ton	Autor <sup>34</sup>
<b>MTAOT</b>	Massa total de água oleosa em toneladas	$VTAOT = VTADT + VTART$	ton	Autor
<b>MTART</b>	Massa total de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas	Valor inicial = 0	ton	Autor <sup>35</sup>

## 5.4 EQUAÇÕES REFERENTES À TOTALIZAÇÃO DA MASSA DE RESÍDUOS OLEOSOS

A “Massa total de resíduos oleosos em toneladas (MTRET) corresponde ao somatório das massas totalizadas em “MTORT” referentes ao “Submodelo de óleo recuperado”, em “MTRST” referentes ao “Submodelo de resíduos sólidos oleosos” e em “MTAOT” referentes ao “Submodelo de água oleosa”.

<sup>34</sup> O valor inicial fica ajustado em “0” em função de ser um estoque que recebe o valor calculado no “FDAOD”.

<sup>35</sup> O valor inicial fica ajustado em “0” em função de ser um estoque que recebe o valor calculado no “FDAOR”.

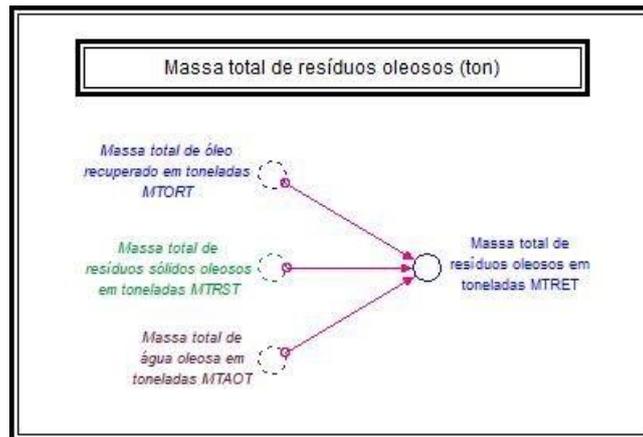


Figura 28: Massa total de resíduos oleosos em toneladas (MTRET).

Os valores iniciais de “MTORT”, de “MTRST” e de “MTAOT” são ajustados no modelo em 0,00 ton em função de expressarem massas variáveis e crescentes ao longo do período da simulação, as quais são dependentes das massas totalizadas respectivamente nos estoques “MTRAT” e “MTRRT” no “Submodelo de óleo recuperado”, nos estoques “MRSAB” e “MRSEP” no “Submodelo de resíduos sólidos oleosos” e nos estoques “MTART” e “MTADT” no “Submodelo de água oleosa”, todos os quais são igualmente ajustados inicialmente em 0,00 ton. Iniciada a simulação, cada um desses seis estoques passa a receber a cada dia de simulação os valores respectivamente calculados para as massas de óleo recuperado nos fluxos “FDORA” e “FDORR” no “Submodelo de óleo recuperado”, nos fluxos “FDRSA” e “FDRSE” no “Submodelo de resíduos sólidos oleosos” e nos fluxos “FDAOR” e “FDAD” no “Submodelo de água oleosa”. Da mesma forma que “MTORT”, de “MTRST” e de “MTAOT”, “MTRET” também tem seu valor inicial ajustado em 0,00 ton por ser dependente dos valores de “MTORT”, “MTRST” e “MTAOT” variáveis ao longo do período da simulação.

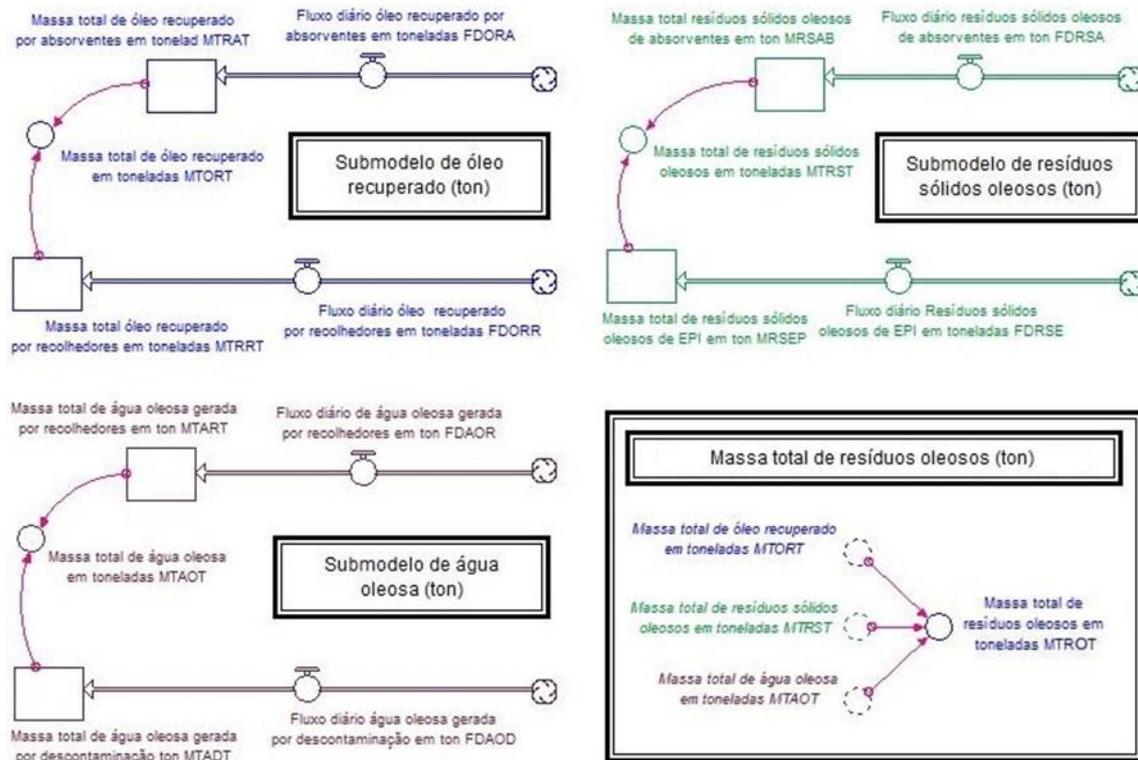


Figura 29: Resumo do modelo.

#### 5.4.1 MTRET: Massa total de resíduos oleosos em toneladas.

$$MTRET = MTORT + MTRST + MTAOT$$

*Equação 49: Massa total de resíduos oleosos em toneladas.*

$$MTRET = 0,00 \text{ ton (valor inicial)} + 0,00 \text{ ton (valor inicial)} \\ + 0,00 \text{ ton (valor inicial)} = 0,00 \text{ ton (valor inicial)}$$

##### 5.4.1.1 MTORT: Massa total de óleo recuperado em toneladas.

$$MTORT = MTRAT + MTRRT$$

*Equação 16: Massa total de óleo recuperado em toneladas.*

$$MTORT = 0,00 \text{ ton (valor inicial)} + 0,00 \text{ ton (valor inicial)} \\ = 0,00 \text{ ton (valor inicial)}$$

#### 5.4.1.2 MTRST: Massa total de resíduos sólidos oleosos em toneladas.

$$\text{MTRST} = \text{MRSAB} + \text{MRSEP}$$

*Equação 29: Massa total de resíduos sólidos oleosos em toneladas.*

$$\begin{aligned} \text{MTRST} &= 0,00 \text{ ton (valor inicial)} + 0,00 \text{ ton (valor inicial)} \\ &= 0,00 \text{ ton (valor inicial)} \end{aligned}$$

#### 5.4.1.3 MTAOT: Massa total de água oleosa em toneladas.

$$\text{MTAOT} = \text{MTADT} + \text{MTART}$$

*Equação 48: Massa total de água oleosa em toneladas.*

$$\begin{aligned} \text{MTAOT} &= 0,00 \text{ ton (valor inicial)} + 0,00 \text{ ton (valor inicial)} \\ &= 0,00 \text{ ton (valor inicial)} \end{aligned}$$

*Tabela 22: Equações e valores referentes à totalização da massa de resíduos e efluentes oleosos.*

CÓDIGO	ITEM	EQUAÇÃO OU VALOR	UNIDADE	FONTE
<b>FDAOD</b>	Fluxo diário de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas	$\text{FDAOD} = (\text{AOBOC} + \text{AOLCB} + \text{AOEMB} + \text{AOEPI} + \text{AOLSK} + \text{AOTQE} + \text{AOTQT}) \times \text{DAOTM}$	ton/dia	Autor
<b>FDAOR</b>	Fluxo diário de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas	$\text{FDAOR} = (\text{AOGCB} + \text{AOGSK}) \times \text{DAOTM}$	ton/dia	Autor
<b>FDORA</b>	Fluxo diário de óleo recuperado por absorventes em toneladas	$\text{FDORA} = \text{ORBAB} + \text{ORMAB}$	ton/dia	Autor
<b>FDORR</b>	Fluxo diário de óleo recuperado por recolhedores em toneladas	$\text{FDORR} = \text{ORCTB} + \text{ORSKT}$	ton/dia	Autor
<b>FDRSA</b>	Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas	$\text{FDRSA} = \text{ROBAB} + \text{ROMAB}$	ton/dia	Autor

<b>FDRSE</b>	Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas	$\text{FDRSE} = \frac{(\text{ROBOT} + \text{ROLUV} + \text{ROMAC})}{\text{FRQTR}}$ $= \frac{\quad}{\text{DUMOD}}$	ton/dia	Autor
<b>MRSAB</b>	Massa total resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas	valor inicial = 0	ton	Autor <sup>36</sup>
<b>MRSEP</b>	Massa total de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas	valor inicial = 0	ton	Autor <sup>37</sup>
<b>MTADT</b>	Massa total de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas	Valor inicial = 0	ton	Autor <sup>38</sup>
<b>MTAOT</b>	Massa total de água oleosa em toneladas	$\text{VTAOT} = \text{VTADT} + \text{VTART}$	ton	Autor
<b>MTART</b>	Massa total de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas	Valor inicial = 0	ton	Autor <sup>39</sup>
<b>MTORT</b>	Massa total de óleo recuperado em toneladas	$\text{MTORT} = \text{MTRAT} + \text{MTRRT}$	ton	Autor
<b>MTRAT</b>	Massa total de óleo recuperado por absorventes em toneladas	valor inicial = 0	ton	Autor <sup>40</sup>
<b>MTRET</b>	Massa total de resíduos oleosos em toneladas	$\text{MTRET} = \text{MTAOT} + \text{MTORT} + \text{MTRST}$	ton	Autor
<b>MTRRT</b>	Massa total óleo recuperado por	valor inicial = 0	ton	Autor <sup>41</sup>

<sup>36</sup> O valor inicial fica ajustado em "0" em função de ser um estoque que recebe o valor calculado em "FRSAB".

<sup>37</sup> O valor inicial fica ajustado em "0" em função de ser um estoque que recebe o valor calculado em "FRSEP".

<sup>38</sup> O valor inicial fica ajustado em "0" em função de ser um estoque que recebe o valor calculado em "FDAOD".

<sup>39</sup> O valor inicial fica ajustado em "0" em função de ser um estoque que recebe o valor calculado em "FDAOR".

<sup>40</sup> O valor inicial fica ajustado em "0" em função de ser um estoque que recebe o valor calculado em "FDORA".

<sup>41</sup> O valor inicial fica ajustado em "0" em função de ser um estoque que recebe o valor calculado em "MTRRT".

	recolhedores em toneladas			
<b>MTRST</b>	Massa total de resíduos sólidos oleosos em toneladas	$MTRST = MRSAB + MRSEP$	ton	Autor

# CAPÍTULO 6

## PLATAFORMA DE MANIPULAÇÃO DO MODELO DE ESTIMATIVAS DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS

**“ Não é o crítico que conta, nem aquele que aponta como o homem forte tropeçou, ou onde o realizador de proezas poderia tê-las feito melhor. Todo o crédito pertence ao homem que está de fato na arena, cuja face está marcada pela poeira, pelo suor e pelo sangue, aquele que luta com valentia, aquele que erra e tenta de novo, até acertar. Aquele que conhece o grande entusiasmo, as grandes devoções e se consome por uma causa justa, aquele que conhecerá, ao fim de sua jornada, o triunfo das grandes realizações, ou, na pior das hipóteses, se falhar, ao menos terá falhado por sua ousadia, na busca do triunfo final dos grandes feitos, de modo que o seu lugar jamais será entre as almas tímidas, que não conhecerão jamais nem a vitória, nem a derrota. ”**

Theodore Roosevelt Jr. – Historiador, Naturalista,  
Explorador, Escritor e 26º Presidente dos EUA  
☆ 1858 / † 1919

## 6 PLATAFORMA DE MANIPULAÇÃO DO MODELO DE ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS

O modelo desenvolvido em Stella, apresentado na Figura 10, faz uso de uma plataforma de comando para a execução da modelagem e manipulação dos dados utilizados, a fim de manter ou alterar os valores das 40 variáveis utilizadas em sua montagem, de acordo com as necessidades do responsável pela modelagem. Em modelos produzidos no software Stella, a manipulação das variáveis, estoques e fluxos incluídos é realizada por meio de um "Painel de Controle", uma interface gráfica onde são apresentadas as informações de entrada e saída por meio de variáveis, gráficos e tabelas onde são apresentados os resultados das simulações. Essa interface gráfica é totalmente flexível, podendo ser construída pelo modelador de acordo com as informações que sejam de seu interesse apresentar. A Figura 26 apresenta o "Painel de Controle" desenvolvido para o modelo.

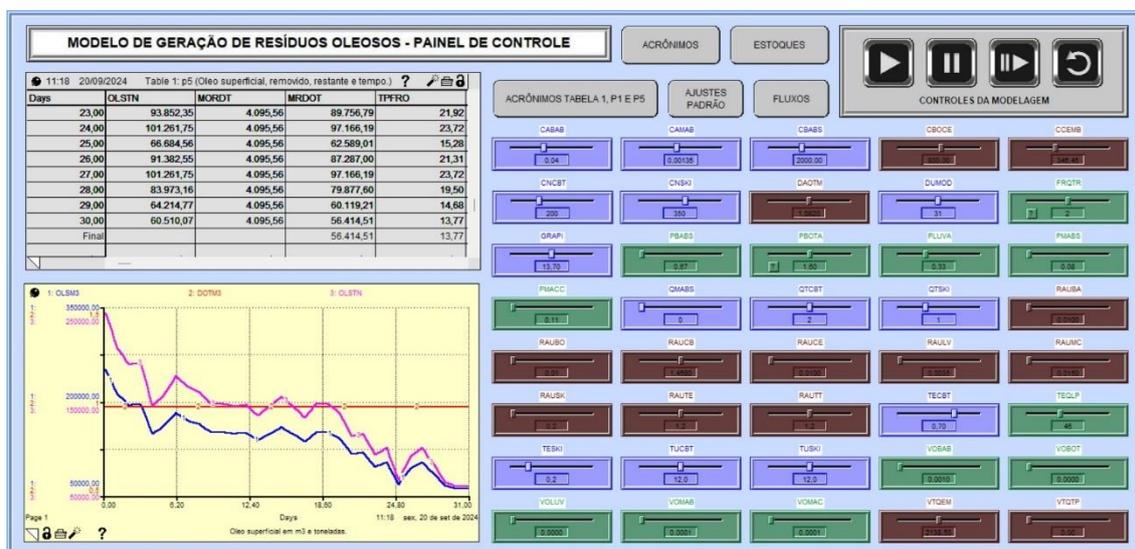


Figura 30: Painel de Controle do modelo.

No "Painel de Controle" do modelo, diversos elementos podem ser observados, cada qual com funções específicas:

- Controles deslizantes (Figura 27): permitem alterar os valores ajustados para cada uma das variáveis representadas por este tipo de controle. Seus limites de amplitude podem ser definidos a critério do modelador, de forma que novos valores para a específica variável podem ser alterados sem que seja necessário alterar o modelo. Os controles deslizantes são codificados nas cores azul, verde

e marrom, respectivamente correspondentes aos submodelos de óleo recuperado, de resíduos sólidos oleosos e de água oleosa.



Figura 31: Controles deslizantes.

- Controles da modelagem (Figura 28): permitem comandar o início da execução da modelagem, sua pausa, reinício e retorno à condição original de todos os controles deslizantes que tenham sido alterados.



Figura 32: Controles da modelagem.

- Botões de informações complementares (Figura 29): os botões de informações complementares são definidos pelo modelador de acordo com suas preferências e objetivos do modelo. Seu acionamento abre janelas com o detalhamento das diversas informações presentes no modelo, correspondentes a suas variáveis, fluxos e estoques.



Figura 33: Botões de informações complementares.

- Janelas de Informações complementares (Figuras 30 a 34): as janelas de informações complementares apresentam todas as codificações e valores das variáveis, fluxos e estoques do modelo. Da mesma forma que os controles deslizantes, é utilizada uma codificação nas cores azul, verde e marrom, respectivamente correspondentes aos submodelos de óleo recuperado, de resíduos sólidos oleosos e de água oleosa.

LISTA DE ACRÔNIMOS - VALORES VARIÁVEIS					
CABAB	Capacidade de absorção de cada barreira por m	PMABS	Peso de cada manta absorvente em kg por unidade	TECBT	Taxa de eficiência dos Current Busters
CAMAB	Capacidade de absorção de cada manta	PMACC	Peso de cada macacão em kg por unidade	TEQLP	Tamanho da equipe de limpeza
CBABS	Comprimento de barreiras absorventes em m	QMABS	Quantidade de mantas absorventes	TESKI	Taxa de eficiência dos Skimmers
CBOCE	Comprimento das barreiras oceânicas em m	QTCBT	Quantidade de Current Busters	TUCBT	Tempo diário de utilização dos Current Busters
CCEMB	Comprimento do costado das embarcações	QTSKI	Quantidade de Skimmers	TUSKI	Tempo diário de utilização dos skimmers
CNCBT	Capacidade nominal dos Current Busters	RAUBA	Razão água utilizada por m de barreira oceânica	VOBAB	Volume de óleo agregado a cada m de barreira absorvente em m <sup>3</sup> por m
CNSKI	Capacidade nominal dos Skimmers	RAUBO	Razão água utilizada por bota	VOBOT	Volume de óleo agregado a cada bota em m <sup>3</sup> por unidade
DAOTM	Densidade da água oleosa em toneladas por m <sup>3</sup>	RAUCB	Razão água utilizada por Current Buster	VOLUV	Volume de óleo agregado a cada luva em m <sup>3</sup> por unidade
DUMOD	Duração da modelagem	RAUCE	Razão água utilizada por m de costado das embarcações	VOMAB	Volume de óleo agregado a cada manta absorvente em m <sup>3</sup> por unidade
FRQTR	Frequência de troca dos EPIs	RAULV	Razão água utilizada por luva	VOMAC	Volume de óleo agregado a cada macacão em m <sup>3</sup> por unidade
GRAPI	Grau API do óleo vazado	RAUMC	Razão água utilizada por macacão	VTQEM	Volume total dos tanques das embarcações
PBABS	Peso de cada m de barreira absorvente em kg por m	RAUSK	Razão água utilizada por skimmer	VTQTP	Volume total dos tanques temporários
PBOTA	Peso de cada par de botas em kg por unidade	RAUTE	Razão água utilizada por m <sup>3</sup> dos tanques embarcações	////	////
PLUVA	Peso de cada par de luvas em kg por unidade	RAUTT	Razão água utilizada por m <sup>3</sup> dos tanques temporários	////	////

Figura 34: Janela aberta pelo botão "Acrônimos".

ESTOQUES - MASSAS TOTAIS DE RESÍDUOS OLEOSOS	
MTAOT	Massa total de água oleosa em toneladas
+	
MTORT	Massa total de óleo recuperado em toneladas
+	
MTRST	Massa total de resíduos sólidos oleosos em toneladas
=	
MTRET	Massa total de resíduos oleosos em toneladas

Figura 35: Janela aberta pelo botão "Estoques".

ACRÔNIMOS - TABELA 1, P1 E P5 A P8	
DOTM3	Densidade do óleo em toneladas por m <sup>3</sup>
FDORA	Fluxo diário de óleo recuperado por absorventes em toneladas
FDORR	Fluxo diário de óleo recuperado por recolhedores em toneladas
MORDT	Massa de óleo removido diariamente em toneladas
MRDOT	Massa remanescente de óleo diária em toneladas
OLSM3	Óleo superficial em m <sup>3</sup>
OLSTN	Óleo superficial em toneladas
TPFRO	Tempo para finalizar remoção do óleo
MTRAT	Massa total de óleo recuperado por absorventes em toneladas
MTRRT	Massa total óleo recuperado por recolhedores em toneladas
FDRSA	Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas
FDRSE	Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas
MRSAB	Massa total resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas
MRSEP	Massa total de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas
MTORT	Massa total de óleo recuperado em toneladas
MTRST	Massa total de resíduos sólidos oleosos em toneladas
FDAOD	Fluxo diário de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas
FDAOR	Fluxo diário de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas
MTADT	Massa total de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas
MTAOT	Massa total de água oleosa em toneladas
MTART	Massa total de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas

Figura 36: Janela aberta pelo botão "Acrônimos - Tabela 1, P1 e P5.

VALORES VARIÁVEIS - AJUSTES PADRÃO					
CABAB	0,036 ton/m	PMABS	0,075 kg/unidade	TECBT	70%
CAMAB	0,00135 ton/unidade	PMACC	0,11 kg/unidade	TEQLP	46 unidades
CBABS	2.000 m	QMABS	0 unidades	TESKI	20%
CBOCE	800 m	QTCBT	2 unidades	TUCBT	12 horas/dia
CCEMB	346,45 m	QTSKI	1 unidade	TUSKI	12 horas/dia
CNCBT	200 m <sup>3</sup> /h	RAUBA	0,01 m <sup>3</sup> /m	VOBAB	0,001 m <sup>3</sup> /m
CNSKI	350 m <sup>3</sup> /h	RAUBO	0,0075 m <sup>3</sup> /unidade	VOBOT	0,00001 m <sup>3</sup> /unidade
DAOTM	1,082 ton/m <sup>3</sup>	RAUCB	1,458 m <sup>3</sup> /unidade	VOLUV	0,00001 m <sup>3</sup> /unidade
DUMOD	31 dias	RAUCE	0,01 m <sup>3</sup> /m	VOMAB	0,0001 m <sup>3</sup> /unidade
FRQTR	2 dias	RAULV	0,0035 m <sup>3</sup> /m	VOMAC	0,00005 m <sup>3</sup> /unidade
GRAPI	13,7 ° API	RAUMC	0,015 m <sup>3</sup> /unidade	VTQEM	2.138,50 m <sup>3</sup>
PBABS	0,67 kg/m	RAUSK	0,2 m <sup>3</sup> /unidade	VTQTP	0,00 m <sup>3</sup>
PBOTA	1,6 kg/unidade	RAUTE	1,2 m <sup>3</sup> /unidade	////	////
PLUVA	0,329 kg/unidade	RAUTT	1,2 m <sup>3</sup> /unidade	////	////

Figura 37: Janela aberta pelo botão "Ajustes padrão".

FLUXOS - GERAÇÃO DIÁRIA DE RESÍDUOS OLEOSOS	
FDAOD	Fluxo diário de água oleosa gerada por descontaminação em toneladas
FDAOR	Fluxo diário de água oleosa gerada por recolhedores em toneladas
FDORA	Fluxo diário de óleo recuperado por absorventes em toneladas
FDORR	Fluxo diário de óleo recuperado por recolhedores em toneladas
FDRSA	Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de absorventes em toneladas
FDRSE	Fluxo diário de resíduos sólidos oleosos de EPI em toneladas

Figura 38: Janela aberta pelo botão "Fluxos".

- Tabelas (Figura 35): embora o Painel de Controle do modelo apresente apenas uma tabela, uma mesma interface gráfica pode apresentar diversas "páginas" de tabelas, de forma que uma mesma simulação pode apresentar um grande volume de informações.

Days	OLSM3	DOTM3	OLSTN
24,00	103.909,58	0,974518	101.261,75
25,00	68.428,26	0,974518	66.684,56
26,00	93.772,06	0,974518	91.382,55
27,00	103.909,58	0,974518	101.261,75
28,00	86.168,92	0,974518	83.973,16
29,00	65.893,88	0,974518	64.214,77
30,00	62.092,31	0,974518	60.510,07
Final	62.092,31	0,974518	

Figura 39: Tabela gerada pelo software Stella.

- Gráficos (Figura 34): da mesma forma que as tabelas, diversos gráficos podem ser gerados em uma mesma simulação.

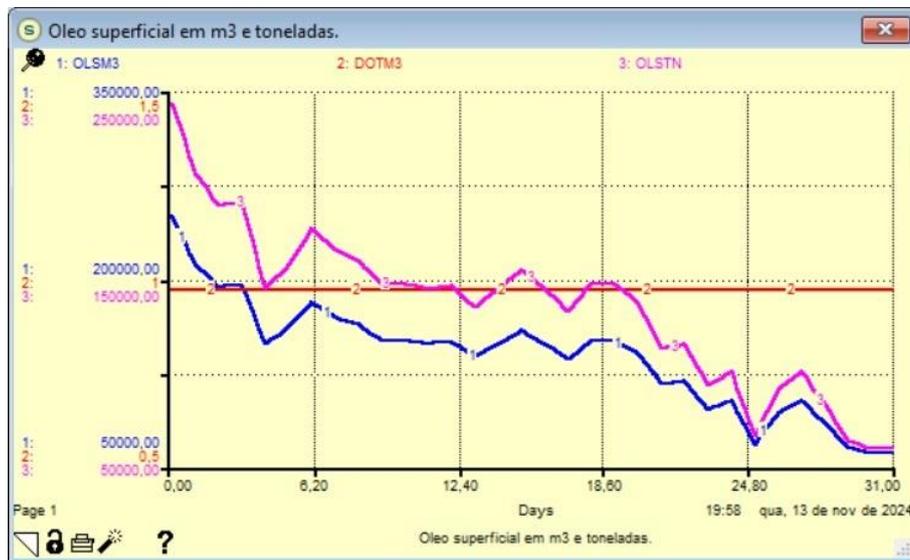


Figura 40: Gráfico gerado pelo software Stella.

# CAPÍTULO 7

## APLICAÇÃO PRÁTICA DO MODELO DE ESTIMATIVA DE RESÍDUOS – CENÁRIO DE PIOR CASO ENAUTA

**“ Tenha em mente que tudo que você aprende na escola é trabalho de muitas gerações. Receba essa herança, honre-a, acrescente a ela e, um dia, fielmente, deposite-a nas mãos de seus filhos. ”**

Albert Einstein – Físico Alemão  
☆ 1804 / † 1869

## 7 APLICAÇÃO PRÁTICA DO MODELO DE ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS – CENÁRIO DE PIOR CASO ENAUTA

Conforme descrito no item 4.1, o cenário de risco escolhido para a modelagem da geração de resíduos foi o volume de pior caso apresentado no documento “Relatório Técnico [rev. 00] Modelagem Hidrodinâmica e Dispersão de Óleo – Campo de Atlanta – Bacia de Santos” (ENAUTA, 2022) correspondente ao vazamento de 1.600.000 barris de óleo, volume estimado a partir do FPSO Atlanta, definindo como cenário de pior caso o vazamento de 253.438 m<sup>3</sup> de óleo em superfície, que é o volume a partir do qual a modelagem da geração de resíduos oleosos foi desenvolvida. Esse cenário de pior caso tomou como base o vazamento ao longo das 24 horas iniciais, seguidas de mais 30 dias de deriva da mancha de óleo totalizando 31 dias, correspondentes a 744 horas de simulação. Para efeito do modelo de geração de resíduos oleosos, o horizonte de tempo escolhido foram os 31 dias totais do cenário de pior caso.

Na Tabela 4 foi apresentada a previsão dos volumes e percentuais de óleo em superfície ao longo dos 31 dias da Modelagem Hidrodinâmica e Dispersão de Óleo (ENAUTA, 2022), em relação ao volume total vazado de 253.438 m<sup>3</sup>. Esses são os primeiros dados inseridos no modelo, na variável OLSM3 (Figura 11 e item 5.1.1.1.1), como pode ser visto na Figura 41, que apresenta os volumes de óleo em superfície até o dia 12.

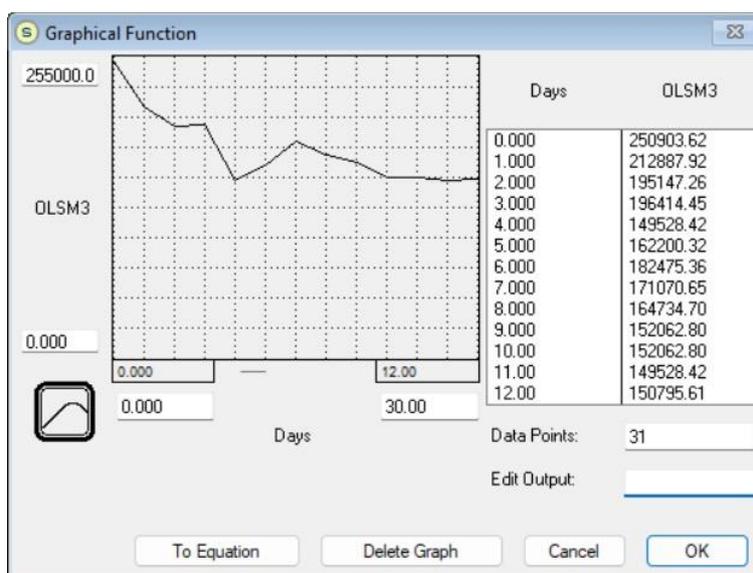


Figura 41: Janela de inserção de dados da variável OLSM3.

Até esse ponto o modelo dispõe dos volumes diários de óleo superficial em  $m^3$ , mas considerando que o modelo geral é formado por submodelos que estimam os quantitativos de resíduos oleosos líquidos (óleo recuperado e água oleosa) e sólidos (resíduos sólidos oleosos), não era adequado a manutenção da unidade de medida de volume em  $m^3$ , o que seria uma unidade de medida inconveniente caso utilizada para os resíduos sólidos. Diante disso, optou-se por converter a unidade de medida de volume em  $m^3$  para a unidade de massa em toneladas, de forma a equalizar os quantitativos de resíduos oleosos líquidos e sólidos calculados pelo modelo.

Para tal, o modelo converte os 13,7 °API do óleo informados em ENAUTA (2022) para sua respectiva densidade em  $ton/m^3$ , mediante a aplicação da Equação 1 embutida no modelo na variável DOTM3, conforme apresentado na Figura 38, resultando em uma densidade de 0,97  $m^3/ton$  a qual é aplicada sobre todos os volumes calculados em  $m^3$ , convertendo-os para massas em toneladas, o que equaliza os resultados dos três submodelos.

A partir dessa conversão, todos os volumes do modelo, calculados em  $m^3$ , são automaticamente convertidos para massa em toneladas, sejam eles resíduos líquidos ou sólidos.

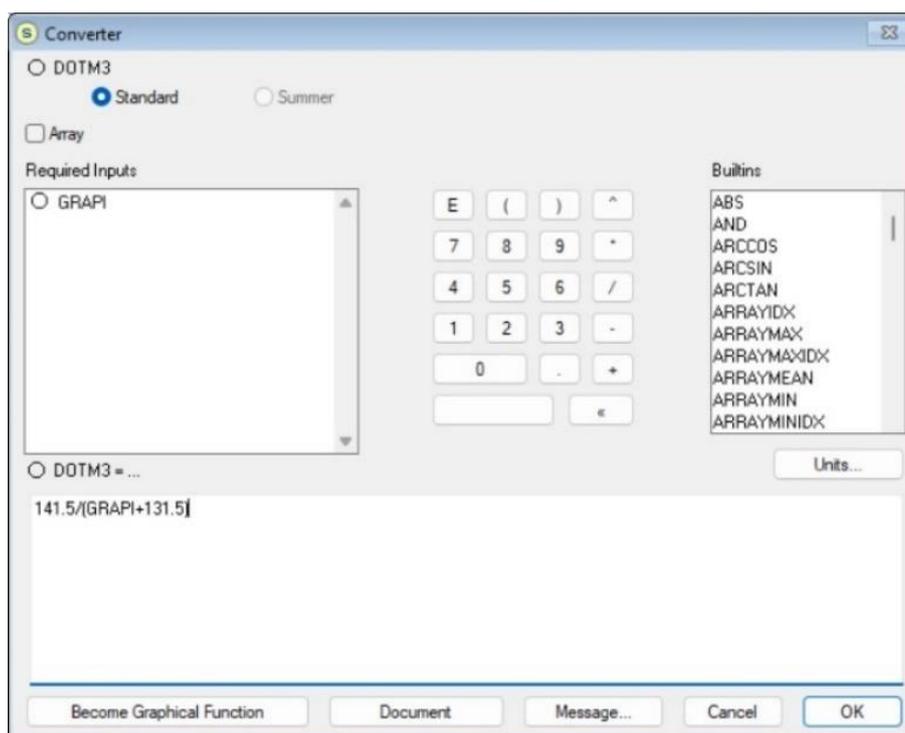


Figura 42: Janela de inserção de dados da variável DOTM3.

Da mesma forma que os valores de OLSM3 na forma de um gráfico e de DOTM3 na forma de uma equação são inseridos no modelo por meio de janelas de inserção como as mostradas nas Figuras 37 e 38, as 40 variáveis presentes no modelo tem seus valores nele inseridos em suas respectivas janelas de inserção de dados. As variáveis presentes no modelo e seus respectivos valores são apresentados na Tabela 23. Todas essas variáveis podem ser manipuladas pelo modelador, ajustando seus valores de acordo com as reais necessidades da modelagem, por meio dos 40 controles deslizantes presentes no Painel de Controle do modelo, conforme mostra a Figura 26.

Tabela 23: Variáveis utilizadas no modelo de geração de resíduos oleosos.

VALORES VARIÁVEIS		
SIGLAS	DESCRIÇÃO	VALOR
<b>CABAB</b>	Capacidade de absorção de cada barreira por m	0,012 ton/m
<b>CAMAB</b>	Capacidade de absorção de cada manta	0,00135 ton/unidade
<b>CBABS</b>	Comprimento de barreiras absorventes em m	2000 m
<b>CBOCE</b>	Comprimento das barreiras oceânicas em m	800 m
<b>CCEMB</b>	Comprimento do costado das embarcações	346,45 m
<b>CNCBT</b>	Capacidade nominal dos Current Busters	200 m <sup>3</sup> /h

<b>CNSKI</b>	Capacidade nominal dos Skimmers	350 m <sup>3</sup> /h
<b>DAOTM</b>	Densidade da água oleosa em toneladas por m <sup>3</sup>	1,082 ton/m <sup>3</sup>
<b>DUMOD</b>	Duração da modelagem	31 dias
<b>FRQTR</b>	Frequência de troca dos EPIs	2 dias
<b>GRAPI</b>	Grau API do óleo vazado	13,7 ° API
<b>PBABS</b>	Peso de cada m de barreira absorvente em kg por m	0,67 kg/m
<b>PBOTA</b>	Peso de cada par de botas em kg por unidade	1,6 kg / unidade
<b>PLUVA</b>	Peso de cada par de luvas em kg por unidade	0,329 kg/unidade
<b>PMABS</b>	Peso de cada manta absorvente em kg por unidade	0,075 kg/unidade
<b>PMACC</b>	Peso de cada macacão em kg por unidade	0,11 kg/unidade
<b>QMABS</b>	Quantidade de mantas absorventes	0 unidades
<b>QTCBT</b>	Quantidade de Current Busters	2 unidades
<b>QTSKI</b>	Quantidade de Skimmers	1 unidade
<b>RAUBA</b>	Razão água utilizada por m de barreira oceânica	0,01 m <sup>3</sup> /m
<b>RAUBO</b>	Razão água utilizada por bota	0,0075 m <sup>3</sup> /unidade
<b>RAUCB</b>	Razão água utilizada por Current Buster	1,458 m <sup>3</sup> /unidade
<b>RAUCE</b>	Razão água utilizada por m de costado das embarcações	0,01 m <sup>3</sup> /m
<b>RAULV</b>	Razão água utilizada por luva	0,0035 m <sup>3</sup> /m
<b>RAUMC</b>	Razão água utilizada por macacão	0,015 m <sup>3</sup> /unidade
<b>RAUSK</b>	Razão água utilizada por skimmer	0,2 m <sup>3</sup> /unidade
<b>RAUTE</b>	Razão água utilizada por m <sup>3</sup> dos tanques embarcações	1,2 m <sup>3</sup> /unidade
<b>RAUTT</b>	Razão água utilizada por m <sup>3</sup> dos tanques temporários	1,2 m <sup>3</sup> /unidade
<b>TECBT</b>	Taxa de eficiência dos Current Busters	70%
<b>TEQLP</b>	Tamanho da equipe de limpeza	46 unidades
<b>TESKI</b>	Taxa de eficiência dos Skimmers	20%
<b>TUCBT</b>	Tempo diário de utilização dos Current Busters	12 horas/dia
<b>TUSKI</b>	Tempo diário de utilização dos skimmers	12 horas/dia
<b>VOBAB</b>	Volume de óleo agregado a cada m de barreira absorvente em m <sup>3</sup> por m	0,001 m <sup>3</sup> /m
<b>VOBOT</b>	Volume de óleo agregado a cada bota em m <sup>3</sup> por unidade	0,00001 m <sup>3</sup> /unidade
<b>VOLUV</b>	Volume de óleo agregado a cada luva em m <sup>3</sup> por unidade	0,00001 m <sup>3</sup> /unidade
<b>VOMAB</b>	Volume de óleo agregado a cada manta absorvente em m <sup>3</sup> por unidade	0,0001 m <sup>3</sup> /unidade
<b>VOMAC</b>	Volume de óleo agregado a cada macacão em m <sup>3</sup> por unidade	0,00005 m <sup>3</sup> /unidade
<b>VTQEM</b>	Volume total dos tanques das embarcações	2.138,50 m <sup>3</sup>
<b>VTQTP</b>	Volume total dos tanques temporários	0,00 m <sup>3</sup>

## 7.1 RESULTADOS REFERENTES AO SUBMODELO DE ÓLEO RECUPERADO

O submodelo de óleo recuperado apresentado na Figura 10 contabiliza o óleo recuperado a partir da extração do óleo contido por materiais absorventes utilizados no cerco e contenção do óleo flutuante, bem como no óleo recuperado a partir de *skimmers* e *current busters*. Após a remoção e separação do óleo contido nos materiais absorventes, esses materiais passam a fazer parte dos resíduos sólidos oleosos conforme descrito no item 7.2, a seguir. Por sua vez, a ação de *skimmers* e *current busters* implica na remoção de óleo em suspensão, o qual passa a fazer parte do submodelo de óleo recuperado ao mesmo tempo em que é gerado um grande volume de água oleosa correspondentes à sua taxa de eficiência, sendo contabilizado no submodelo de água oleosa, conforme descrito no item 7.3. Apresentado na Figura 10 e suas respectivas equações apresentadas no item 5.1, o submodelo de óleo recuperado caracteriza-se por dois grupos de resíduos representados pelo óleo recuperado por material absorvente e pelos equipamentos recolhedores e suas variáveis e respectivas equações e valores apresentados nas Tabelas 13 a 15. O óleo recuperado por material absorvente - FDORA, descrito no item 5.1.3, se compõe de óleo absorvido por mantas (ORMAB) e barreiras absorventes (ORBAB), ao passo que o óleo recuperado por recolhedores - FDORR, descrito no item 5.1.4, se compõe de óleo recuperado por *skimmers* (ORSKT) e *current busters* (ORCBT).

Ao final dos 31 dias de simulação, o modelo aponta a geração de 80 toneladas de óleo recuperado por materiais absorventes (MTRAT) e 126.882,23 toneladas de óleo recuperado por recolhedores (MTRRT), o que totaliza a geração de 126.962,23 toneladas de óleo recuperado (MTORT). As Figuras 39 e 40 sintetizam esses resultados.

Days	FDORA	FDORR	MTRAT	MTRRT	MTORT
,00	2,58	4.092,98	0,00	0,00	0,00
1,00	2,58	4.092,98	2,58	4.092,98	4.095,56
2,00	2,58	4.092,98	5,16	8.185,95	8.191,11
3,00	2,58	4.092,98	7,74	12.278,93	12.286,67
4,00	2,58	4.092,98	10,32	16.371,90	16.382,22
5,00	2,58	4.092,98	12,90	20.464,88	20.477,78
6,00	2,58	4.092,98	15,48	24.557,85	24.573,34
7,00	2,58	4.092,98	18,06	28.650,83	28.668,89
8,00	2,58	4.092,98	20,65	32.743,80	32.764,45
9,00	2,58	4.092,98	23,23	36.836,78	36.860,00
10,00	2,58	4.092,98	25,81	40.929,75	40.955,56
11,00	2,58	4.092,98	28,39	45.022,73	45.051,11
12,00	2,58	4.092,98	30,97	49.115,70	49.146,67
13,00	2,58	4.092,98	33,55	53.208,68	53.242,23
14,00	2,58	4.092,98	36,13	57.301,65	57.337,78
15,00	2,58	4.092,98	38,71	61.394,63	61.433,34
16,00	2,58	4.092,98	41,29	65.487,60	65.528,89
17,00	2,58	4.092,98	43,87	69.580,58	69.624,45
18,00	2,58	4.092,98	46,45	73.673,55	73.720,01
19,00	2,58	4.092,98	49,03	77.766,53	77.815,56
20,00	2,58	4.092,98	51,61	81.859,50	81.911,12
21,00	2,58	4.092,98	54,19	85.952,48	86.006,67
22,00	2,58	4.092,98	56,77	90.045,45	90.102,23
23,00	2,58	4.092,98	59,35	94.138,43	94.197,78
24,00	2,58	4.092,98	61,94	98.231,40	98.293,34
25,00	2,58	4.092,98	64,52	102.324,38	102.388,90
26,00	2,58	4.092,98	67,10	106.417,36	106.484,45
27,00	2,58	4.092,98	69,68	110.510,33	110.580,01
28,00	2,58	4.092,98	72,26	114.603,31	114.675,56
29,00	2,58	4.092,98	74,84	118.696,28	118.771,12
30,00	2,58	4.092,98	77,42	122.789,26	122.866,68
Final			80,00	126.882,23	126.962,23

Figura 43: Resultados do submodelo de óleo recuperado - Tabela.

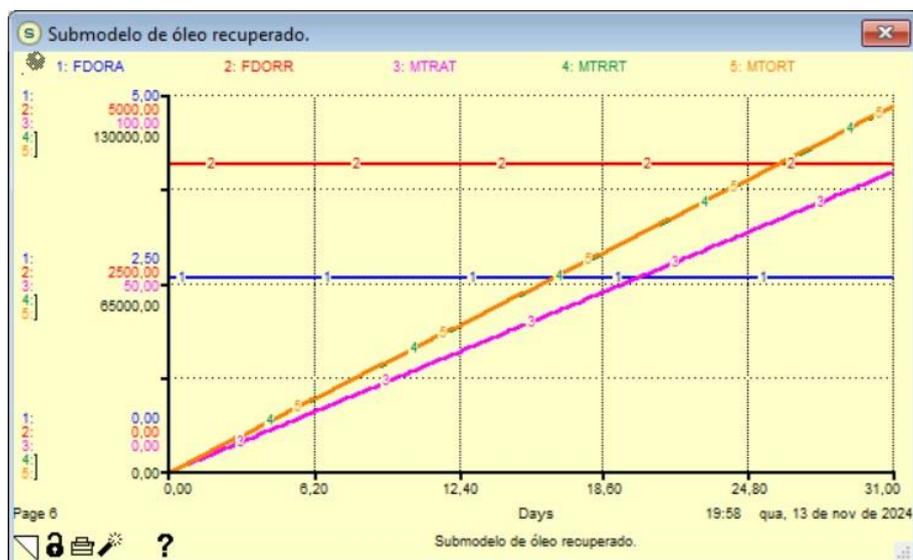


Figura 44: Resultados do submodelo de óleo recuperado - Gráfico.

## 7.2 RESULTADOS REFERENTES AO SUBMODELO DE RESÍDUOS SÓLIDOS OLEOSOS

O submodelo de resíduos sólidos oleosos apresentado na Figura 16 contabiliza a massa descartada de materiais absorventes utilizados no cerco e contenção do óleo flutuante, que se mantém contaminados por resíduos oleosos após a extração do óleo neles contido, que por sua vez faz parte do submodelo de óleo recuperado, descrito no item 7.1. Por outro lado, o submodelo de resíduos sólidos oleosos inclui as massas de EPI's (botas, luvas e macacões) após sua descontaminação e descarte. A descontaminação dos EPI's, por sua vez, gera um volume de água oleosa que passa a fazer parte do submodelo de água oleosa após sua conversão para massa em toneladas, conforme descrito no item 7.3. Apresentado na Figura 16 e suas respectivas equações apresentadas no item 5.2, o submodelo de resíduos sólidos oleosos caracteriza-se por dois grupos de resíduos representados pelos resíduos sólidos oleosos gerados por materiais absorventes e pelos resíduos sólidos oleosos gerados por EPI's e suas variáveis e respectivas equações e valores apresentados nas Tabelas 16 a 18. Os resíduos sólidos oleosos gerados por absorventes - FDRSA, descrito no item 5.2.1, se compõe dos resíduos sólidos oleosos gerados por mantas absorventes (ROMAB) e barreiras absorventes (ROBAB), ao passo que os resíduos sólidos oleosos gerados por EPI's - FDRSE, descrito no item 5.2.2, se compõe de resíduos sólidos oleosos gerados por botas (ROBOT), luvas (ROLUV) e macacões (ROMAC).

Ao final dos 31 dias de simulação, o modelo aponta a geração de 3,29 toneladas de resíduos sólidos oleosos gerados por materiais absorventes (MRSAB) e 0,05 toneladas de resíduos sólidos gerados por EPI's (MRSEP), o que totaliza a geração de 3,34 toneladas de resíduos sólidos oleosos (MTRST). As Figuras 41 e 42 sintetizam esses resultados.

Submodelo de resíduos sólidos oleosos.

19:58 13/11/2024 Table 1: p7 (Submodelo de resíduos sólidos oleosos.)

Days	FDRSA	FDRSE	MRSAB	MRSEP	MTRST
,00	0,11	1,564160e-003	0,00	0,00	0,00
1,00	0,11	1,564160e-003	0,11	0,00	0,11
2,00	0,11	1,564160e-003	0,21	0,00	0,22
3,00	0,11	1,564160e-003	0,32	0,00	0,32
4,00	0,11	1,564160e-003	0,42	0,01	0,43
5,00	0,11	1,564160e-003	0,53	0,01	0,54
6,00	0,11	1,564160e-003	0,64	0,01	0,65
7,00	0,11	1,564160e-003	0,74	0,01	0,75
8,00	0,11	1,564160e-003	0,85	0,01	0,86
9,00	0,11	1,564160e-003	0,95	0,01	0,97
10,00	0,11	1,564160e-003	1,06	0,02	1,08
11,00	0,11	1,564160e-003	1,17	0,02	1,18
12,00	0,11	1,564160e-003	1,27	0,02	1,29
13,00	0,11	1,564160e-003	1,38	0,02	1,40
14,00	0,11	1,564160e-003	1,49	0,02	1,51
15,00	0,11	1,564160e-003	1,59	0,02	1,61
16,00	0,11	1,564160e-003	1,70	0,03	1,72
17,00	0,11	1,564160e-003	1,80	0,03	1,83
18,00	0,11	1,564160e-003	1,91	0,03	1,94
19,00	0,11	1,564160e-003	2,02	0,03	2,05
20,00	0,11	1,564160e-003	2,12	0,03	2,15
21,00	0,11	1,564160e-003	2,23	0,03	2,26
22,00	0,11	1,564160e-003	2,33	0,03	2,37
23,00	0,11	1,564160e-003	2,44	0,04	2,48
24,00	0,11	1,564160e-003	2,55	0,04	2,58
25,00	0,11	1,564160e-003	2,65	0,04	2,69
26,00	0,11	1,564160e-003	2,76	0,04	2,80
27,00	0,11	1,564160e-003	2,86	0,04	2,91
28,00	0,11	1,564160e-003	2,97	0,04	3,01
29,00	0,11	1,564160e-003	3,08	0,05	3,12
30,00	0,11	1,564160e-003	3,18	0,05	3,23
Final			3,29	0,05	3,34

Figura 45: Resultados do submodelo de resíduos sólidos oleosa - Tabela.

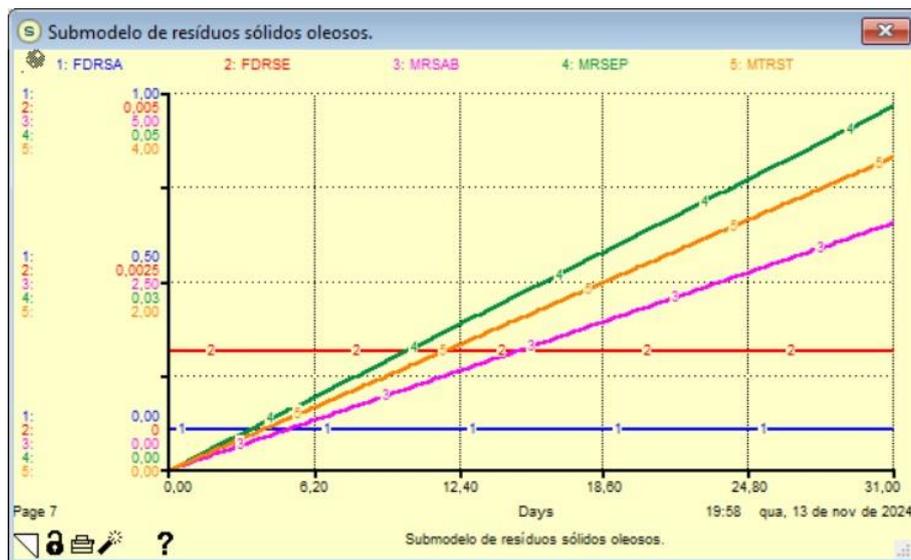


Figura 46: Resultados do submodelo de resíduos sólidos oleosos - Gráfico.

### 7.3 RESULTADOS REFERENTES AO SUBMODELO DE ÁGUA OLEOSA

O submodelo de água oleosa apresentado na Figura 20 por um lado contabiliza a massa de água oleosa produzida por skimmers e current busters, em função de sua taxa de eficiência, ao passo que o óleo recuperado por esses equipamentos é contabilizado no submodelo de óleo recuperado, como exposto no item 7.1. Por outro lado, o submodelo de água oleosa contabiliza a massa de água oleosa gerada pela descontaminação dos próprios skimmers e current busters, das embarcações, dos EPI's descartados (cujas massas fazem parte do submodelo de resíduos sólidos oleosos, como descrito no item 7.2), das barreiras oceânicas, dos tanques de óleo temporários e dos tanques das embarcações. Apresentado na Figura 20 e suas respectivas equações apresentadas no item 5.3, o submodelo de água oleosa caracteriza-se por dois grupos de resíduos representados pela água oleosa gerada por recolhedores (skimmers e current busters) e pela água oleosa gerada por descontaminação – FDAOD e suas variáveis e respectivas equações e valores apresentados nas Tabelas 19 a 21. A água oleosa gerada por recolhedores – FDAOR, descrita no item 5.3.1, se compõe da água oleosa gerada por skimmers (AOGSK) e por current busters (AOCBT), ao passo que a água oleosa gerada pela descontaminação – FDAOD, descrita no item 5.3.2, se compõe da água oleosa gerada por lavagem de embarcações (AOEMB), de EPI's (AOEPI), de skimmers (AOLSK), de current busters (AOLCB), de barreiras oceânicas (AOBOC), de tanques das embarcações (AOTQE) e de tanques temporários (AOTQT).

Ao final dos 31 dias de simulação, o modelo aponta a geração de 161.001,60 toneladas de água oleosa gerada por recolhedores (MTART) e 2.812,46 toneladas de água oleosa gerada por descontaminação (MTADT), o que totaliza a geração de 163.814,06 toneladas de água oleosa (MTAOT). As Figuras 43 e 44 sintetizam esses resultados.

Submodelo de água oleosa.

19:58 13/11/2024 Table 1: p8 (Submodelo de água oleosa.)

Days	FDAOR	FDAOD	MTART	MTADT	MTAOT
,00	5.193,60	90,72	0,00	0,00	0,00
1,00	5.193,60	90,72	5.193,60	90,72	5.284,32
2,00	5.193,60	90,72	10.387,20	181,45	10.568,65
3,00	5.193,60	90,72	15.580,80	272,17	15.852,97
4,00	5.193,60	90,72	20.774,40	362,90	21.137,30
5,00	5.193,60	90,72	25.968,00	453,62	26.421,62
6,00	5.193,60	90,72	31.161,60	544,35	31.705,95
7,00	5.193,60	90,72	36.355,20	635,07	36.990,27
8,00	5.193,60	90,72	41.548,80	725,80	42.274,60
9,00	5.193,60	90,72	46.742,40	816,52	47.558,92
10,00	5.193,60	90,72	51.936,00	907,25	52.843,25
11,00	5.193,60	90,72	57.129,60	997,97	58.127,57
12,00	5.193,60	90,72	62.323,20	1.088,70	63.411,90
13,00	5.193,60	90,72	67.516,80	1.179,42	68.696,22
14,00	5.193,60	90,72	72.710,40	1.270,14	73.980,54
15,00	5.193,60	90,72	77.904,00	1.360,87	79.264,87
16,00	5.193,60	90,72	83.097,60	1.451,59	84.549,19
17,00	5.193,60	90,72	88.291,20	1.542,32	89.833,52
18,00	5.193,60	90,72	93.484,80	1.633,04	95.117,84
19,00	5.193,60	90,72	98.678,40	1.723,77	100.402,17
20,00	5.193,60	90,72	103.872,00	1.814,49	105.686,49
21,00	5.193,60	90,72	109.065,60	1.905,22	110.970,82
22,00	5.193,60	90,72	114.259,20	1.995,94	116.255,14
23,00	5.193,60	90,72	119.452,80	2.086,67	121.539,47
24,00	5.193,60	90,72	124.646,40	2.177,39	126.823,79
25,00	5.193,60	90,72	129.840,00	2.268,12	132.108,12
26,00	5.193,60	90,72	135.033,60	2.358,84	137.392,44
27,00	5.193,60	90,72	140.227,20	2.449,56	142.676,76
28,00	5.193,60	90,72	145.420,80	2.540,29	147.961,09
29,00	5.193,60	90,72	150.614,40	2.631,01	153.245,41
30,00	5.193,60	90,72	155.808,00	2.721,74	158.529,74
Final			161.001,60	2.812,46	163.814,06

Figura 47: Resultados do submodelo de água oleosa - Tabela.

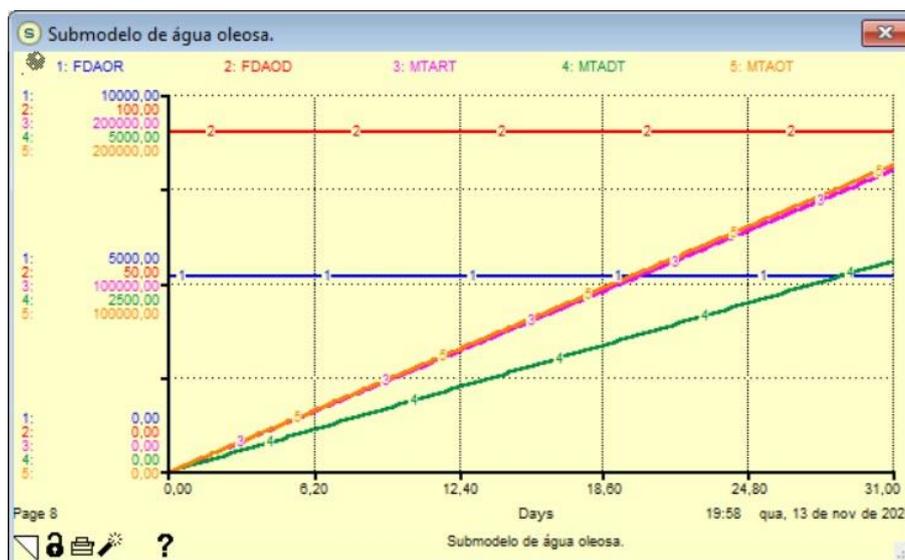


Figura 48: Resultados do submodelo de água oleosa - Gráfico.

#### **7.4 RESULTADOS REFERENTES À MASSA TOTAL DE RESÍDUOS OLEOSOS GERADOS**

Uma vez calculadas as correspondentes massas em toneladas de resíduos oleosos por meio dos submodelos de água oleosa (MTAOT), de óleo recuperado (MTORT) e de resíduos sólidos oleosos (MTRST), o modelo calcula o somatório dessas três massas de resíduos, chegando à massa total em toneladas de resíduos oleosos (MTRET), conforme a Equação 49, abaixo reproduzida:

$$MTRET = MTAOT + MTORT + MTRST$$

Ao final dos 31 dias de simulação, o modelo aponta a geração de 163.814,06 toneladas de água oleosa (MTAOT), de 126.962,23 toneladas de óleo recuperado (MTORT) e de 3,34 toneladas de resíduos sólidos oleosos (MTRST), o que totaliza a geração de 290.779,63 toneladas de resíduos oleosos recuperados (MTRET). As Figuras 49 e 50 sintetizam esses resultados.

Days	MTAOT	MTORT	MTRST	MTRET
,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	5.284,32	4.095,56	0,11	9.379,99
2,00	10.568,65	8.191,11	0,22	18.759,98
3,00	15.852,97	12.286,67	0,32	28.139,96
4,00	21.137,30	16.382,22	0,43	37.519,95
5,00	26.421,62	20.477,78	0,54	46.899,94
6,00	31.705,95	24.573,34	0,65	56.279,93
7,00	36.990,27	28.668,89	0,75	65.659,92
8,00	42.274,60	32.764,45	0,86	75.039,90
9,00	47.558,92	36.860,00	0,97	84.419,89
10,00	52.843,25	40.955,56	1,08	93.799,88
11,00	58.127,57	45.051,11	1,18	103.179,87
12,00	63.411,90	49.146,67	1,29	112.559,86
13,00	68.696,22	53.242,23	1,40	121.939,85
14,00	73.980,54	57.337,78	1,51	131.319,83
15,00	79.264,87	61.433,34	1,61	140.699,82
16,00	84.549,19	65.528,89	1,72	150.079,81
17,00	89.833,52	69.624,45	1,83	159.459,80
18,00	95.117,84	73.720,01	1,94	168.839,79
19,00	100.402,17	77.815,56	2,05	178.219,77
20,00	105.686,49	81.911,12	2,15	187.599,76
21,00	110.970,82	86.006,67	2,26	196.979,75
22,00	116.255,14	90.102,23	2,37	206.359,74
23,00	121.539,47	94.197,78	2,48	215.739,73
24,00	126.823,79	98.293,34	2,58	225.119,71
25,00	132.108,12	102.388,90	2,69	234.499,70
26,00	137.392,44	106.484,45	2,80	243.879,69
27,00	142.676,76	110.580,01	2,91	253.259,68
28,00	147.961,09	114.675,56	3,01	262.639,67
29,00	153.245,41	118.771,12	3,12	272.019,66
30,00	158.529,74	122.866,68	3,23	281.399,64
Final	163.814,06	126.962,23	3,34	290.779,63

Figura 49: Massas de resíduos calculadas pelos submodelos e massa total de resíduos oleosos – Tabela.

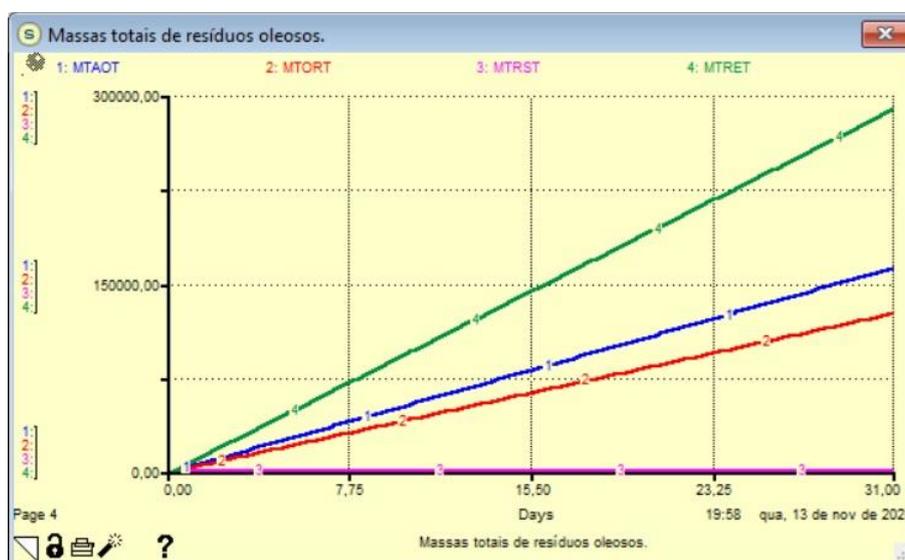


Figura 50: Massas de resíduos calculadas pelos submodelos e massa total de resíduos oleosos – Gráfico.

## 7.5 SÍNTESE DOS RESULTADOS DA MODELAGEM – CENÁRIO DE PIOR CASO ENAUTA

O cenário de pior caso extraído de ENAUTA (2020) considera o vazamento de 1.600.000 barris de petróleo com °API 13,7 a partir do FPSO Atlanta, caracterizando o volume de 253.438 m<sup>3</sup> como o cenário de pior caso. Por sua vez, na conversão de volume em m<sup>3</sup> para sua correspondente massa em toneladas, o vazamento de pior caso equivale a 246,979,87 toneladas de petróleo, tendo como base a aplicação de sua densidade em m<sup>3</sup> (DOTM3) calculada em 0,9745179 ton/m<sup>3</sup>, conforme aplicação da Equação 4:

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141,5}{\text{densidade}} - 131,5 \Leftrightarrow \text{DOTM3} = \frac{141,5}{\text{GRAPI} + 131,5}$$

Em resumo, 253.438 m<sup>3</sup> x 0,9745179 ton/m<sup>3</sup> = 246,979,87 toneladas.

Conforme a Tabela 4, observamos que o volume de óleo vazado que fica inicialmente disponível em superfície corresponde a 99% do volume de 253.438 m<sup>3</sup>, ou seja, 250.903,62 m<sup>3</sup>. A distribuição do óleo em superfície e seus respectivos percentuais em relação ao volume total do vazamento são apresentados na Figura 51. Ainda de acordo com a Tabela 4, podemos observar que nos 30 dias subsequentes ao dia do vazamento o volume de óleo superficial tem a tendência de redução gradual, em função dos processos físico-químicos e biológicos descritos no item 2.6. A conversão de cada um desses volumes diários em m<sup>3</sup> a suas correspondentes massas em toneladas é realizada internamente ao modelo, por meio da aplicação da Equação 4, já citada.



*Figura 51: Volume de óleo em superfície ao longo do período da simulação e respectivos percentuais em relação ao volume do vazamento (ENAUTA, 2022).*

Ao final da modelagem, a totalização dos resultados obtidos nos itens 7.1 (óleo recuperado), 7.2 (resíduos sólidos oleosos) e 7.3 (água oleosa) indica que diante de um cenário de pior caso de vazamento de 246,979,87 toneladas de petróleo, a aplicação da estratégia de resposta da contenção e recolhimento do óleo em suspensão teria gerado um volume de 290.776,29 toneladas de resíduos líquidos e 3,34 toneladas de resíduos sólidos, totalizando 290.779,63 toneladas de resíduos. As Figuras 52 e 53 sintetizam esses resultados.

Massa de óleo em superfície e resíduos gerados.				
19:58 13/11/2024 Table 1: p9 (Massa de óleo e...perfície e resíduos gerados.)				
Days	Vazam total em ton	Resíduos líquidos	Resíduos sólidos	Total de resíduos
,00	246.979,87	0,00	0,00	0,00
1,00	246.979,87	9.379,88	0,11	9.379,99
2,00	246.979,87	18.759,76	0,22	18.759,98
3,00	246.979,87	28.139,64	0,32	28.139,96
4,00	246.979,87	37.519,52	0,43	37.519,95
5,00	246.979,87	46.899,40	0,54	46.899,94
6,00	246.979,87	56.279,28	0,65	56.279,93
7,00	246.979,87	65.659,16	0,75	65.659,92
8,00	246.979,87	75.039,04	0,86	75.039,90
9,00	246.979,87	84.418,92	0,97	84.419,89
10,00	246.979,87	93.798,80	1,08	93.799,88
11,00	246.979,87	103.178,68	1,18	103.179,87
12,00	246.979,87	112.558,57	1,29	112.559,86
13,00	246.979,87	121.938,45	1,40	121.939,85
14,00	246.979,87	131.318,33	1,51	131.319,83
15,00	246.979,87	140.698,21	1,61	140.699,82
16,00	246.979,87	150.078,09	1,72	150.079,81
17,00	246.979,87	159.457,97	1,83	159.459,80
18,00	246.979,87	168.837,85	1,94	168.839,79
19,00	246.979,87	178.217,73	2,05	178.219,77
20,00	246.979,87	187.597,61	2,15	187.599,76
21,00	246.979,87	196.977,49	2,26	196.979,75
22,00	246.979,87	206.357,37	2,37	206.359,74
23,00	246.979,87	215.737,25	2,48	215.739,73
24,00	246.979,87	225.117,13	2,58	225.119,71
25,00	246.979,87	234.497,01	2,69	234.499,70
26,00	246.979,87	243.876,89	2,80	243.879,69
27,00	246.979,87	253.256,77	2,91	253.259,68
28,00	246.979,87	262.636,65	3,01	262.639,67
29,00	246.979,87	272.016,53	3,12	272.019,66
30,00	246.979,87	281.396,41	3,23	281.399,64
Final	246.979,87	290.776,29	3,34	290.779,63

Figura 52: Massa total do vazamento, massas de resíduos líquidos e sólidos e massa total de resíduos gerados calculadas pelo modelo – Tabela.

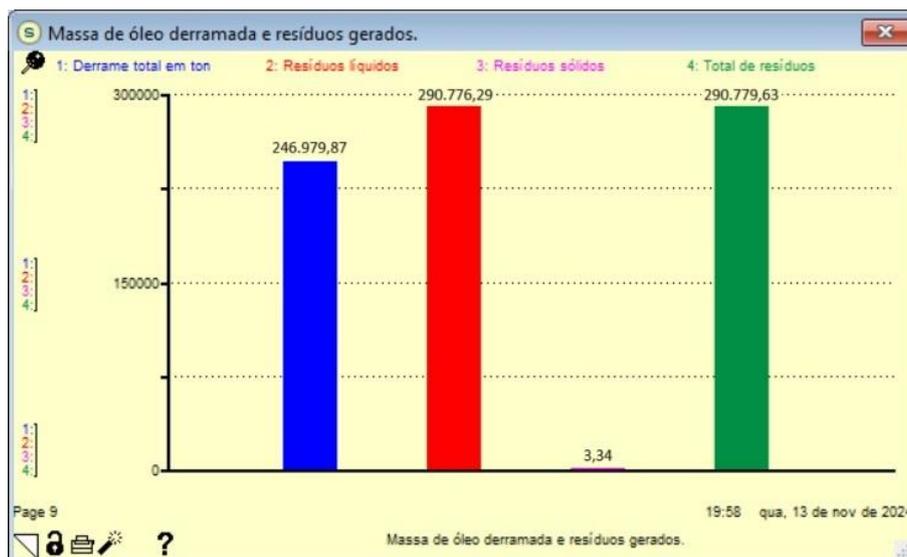


Figura 53: Massa total do vazamento, massas de resíduos líquidos e sólidos e massa total de resíduos gerados calculados pelo modelo – Gráfico.

Dos resultados apresentados pela Figura 52 podemos concluir que a massa total de resíduos gerados de 290.779,63 toneladas corresponde a 117,73% da massa de óleo vazada, de 246.979,87 toneladas, e que o montante de 290.776,29 toneladas de resíduos líquidos corresponde a 99,9989% do total geral das 290.779,63 toneladas de resíduos gerados. Cabe ainda destacar que apesar de caracterizar uma massa de resíduos ínfima em termos relativos face à massa total de resíduos gerada, as 3,34 toneladas de resíduos sólidos gerados, correspondentes a apenas 0,0011% da massa de resíduos gerada, consideradas em termos absolutos não podem ser desprezadas, tendo em vista tratar-se de material contaminado, que demanda uma correta destinação e tratamento para descarte.

# DISCUSSÃO

**“ Não se espante com a altura do voo. Quanto mais alto, mais longe do perigo. Quanto mais você se eleva, mais tempo há de reconhecer uma pane. É quando se está próximo do solo que se deve desconfiar. ”**

Santos Dumont – Aeronauta e Inventor Brasileiro  
☆ 1873 / † 1932

## DISCUSSÃO

A proposta de desenvolver um modelo computacional para estimar a geração de resíduos oleosos a partir de cenários de vazamentos de petróleo é um desafio bastante árduo e estimulante, tendo em vista o ineditismo e complexidade do tema, bem como a relevância do conhecimento gerado tanto para a indústria que se beneficia de uma nova ferramenta de planejamento, quanto para o órgão ambiental que amplia sua capacidade de avaliar a real extensão dos impactos ambientais da atividade.

No entanto, esse ineditismo esbarrou na carência de dados primários ou mesmo secundários que servissem como base de dados para a modelagem. Mesmo após uma extensa revisão de literatura, não foi identificado um único artigo que trate da abordagem do dimensionamento dos resíduos oleosos gerados por vazamentos de petróleo no mar, em função das operações de resposta e dos equipamentos, materiais, embarcações e pessoal envolvido. Diante dessa lacuna, a primeira alternativa avaliada para a obtenção de dados primários foi a realização de uma pesquisa de campo junto às empresas operadores de óleo e gás, mas o advento da pandemia global de COVID-19 inviabilizou a pesquisa não apenas naqueles momentos, mas também a posteriori. Face a essa limitação, optou-se por uma série de pesquisas “ad-hoc” com especialistas da área de meio ambiente da Enauta e da AlBriggs, e com profissionais das empresas Bracol, Kalipso EPI, Dupont, Danny, ProtCap, Delta Pluss e LavEPI, especializadas em equipamentos de proteção individual (EPI’s), Tiger Rentank do Brasil especializada em lavagem e descontaminação de tanques de embarcações, Eco Response, especializada em equipamentos de resposta à emergências, e Grupo CBO, companhia de navegação de apoio marítimo e portuário às empresas de exploração e produção de petróleo e gás. O conjunto de informações recebido formou um escopo suficiente à alimentação do modelo, ainda que fundamentado em bases teóricas e empíricas. Essa carência de informações de base acadêmica, experimental, leva-nos desde já a pensar na evolução e amadurecimento da atual pesquisa, por meio de um Pós-Doutorado, que aí sim, deverá ser inteiramente voltado ao levantamento de tais informações, em parceria com empresas de exploração e produção de petróleo e gás natural, além, naturalmente, do próprio IBAMA. As pesquisas advindas dessa lacuna de conhecimento poderão focar em estudos de quantificação dos métodos de descontaminação, focando no consumo de

água e surfactantes utilizados no processo, em melhorias nas capacidades de resposta de recolhedores e correspondente minimização da geração de água oleosa, na melhoria das capacidades de absorção dos materiais absorventes.

A complexidade do tema se reflete no amplo espectro de condições que são determinantes na geração de resíduos oleosos em casos de vazamento de óleo para o mar. A geração de resíduos oleosos a partir da implementação das ações de resposta está diretamente relacionada com o compartimento ambiental atingido pelo óleo, seja os pouco observáveis assoalho marinho e coluna d'água, seja os mais evidentes como a superfície d'água e a costa. A contenção e recolhimento do óleo restrito à superfície tem a tendência de gerar mais resíduos oleosos, ao passo que as ações de combate necessárias ao ocorrer o toque de óleo na costa incrementam a geração de resíduos sólidos, muito dependentes do ambiente costeiro atingido, como estuários, marismas, manguezais, praias arenosas de diferentes granulometrias, costões rochosos, dentre outras características do litoral. Cada compartimento apresenta condições próprias na geração de resíduos, tanto no que se refere à tipologia quanto à volumetria dos resíduos oleosos gerados. Diante dessa complexidade e diante do ineditismo do modelo e das dificuldades inerentes a seu desenvolvimento, optou-se por restringir o modelo ora apresentado à estimativa dos resíduos oleosos sólidos e líquidos<sup>42</sup> de origem específica das operações de contenção e recolhimento do óleo superficial. Em uma visão mais ampla, e já projetando para o futuro a ampliação da pesquisa, o modelo expandido em uma segunda etapa poderá incorporar outras categorias de resíduos, geradas pelas ações de combate nos outros compartimentos e ambientes costeiros.

O desafio de superar a ausência de informações básicas para o desenvolvimento do modelo se enquadra em uma das mais marcantes características da indústria de exploração e produção de petróleo e gás natural, que tem em seu dinamismo a rápida adaptação a novas tecnologias. Como tal, espera-se que a modelagem ora proposta seja entendida como um elemento que agrega valor à questão da análise de risco, indo além

---

<sup>42</sup> O termo “efluente” não é utilizado na presente pesquisa para designar os resíduos líquidos, correspondentes ao óleo recuperado e à água oleosa gerada, uma vez que o termo “efluente” é mais adequado para designar resíduos líquidos de processos industriais ou domésticos, o que não se aplica ao presente estudo.

das já consagradas estratégias de avaliação de impactos ambientais, ao permitir uma avaliação mais próxima da realidade na medida em que o prognóstico da geração de resíduos oleosos permite o melhor dimensionamento dos impactos ambientais de todo o cenário do acidente, não se restringindo às consequências do vazamento em si.

A indústria de petróleo e gás offshore enfrenta o constante risco de vazamentos de óleo, eventos com impactos socioambientais potencialmente significativos. Diante disso, as empresas do setor são obrigadas a apresentar, desde o início do processo de licenciamento, estudos de análise de risco ao IBAMA, os quais tradicionalmente focam na modelagem hidrodinâmica e de dispersão do óleo, sendo omissos quanto à previsão da geração de resíduos, um aspecto crucial na resposta a vazamentos. Em linhas gerais, as modelagens de dispersão de óleo se limitam a estimativas de “se”, “quando”, “quanto” e “onde” haverá o toque de óleo na costa, quais as unidades de conservação e municípios costeiros que podem ser atingidos, a extensão da dispersão do óleo, mas não apresentam nenhuma visão referente ao período pós-combate ao vazamento e os respectivos resíduos gerados por essas operações. Ou seja, existe um “gap” de conhecimento importante, na medida em que toda ação de combate a vazamentos de óleo tem uma correspondente geração de resíduos oleosos que ao não ser dimensionada pode acarretar problemas não previstos em paralelo e/ou posteriormente ao combate ao vazamento. O presente estudo supre essa lacuna ao propor um sistema de modelagem que estima as massas de resíduos oleosos gerados pelas operações de contenção e recolhimento de óleo em superfície, expressas em toneladas.

A relevância do modelo reside em sua capacidade de fornecer uma estimativa prévia da quantidade de resíduos, complementando as informações dos estudos de dispersão de óleo. Esta informação é de grande importância para as empresas de exploração e produção de petróleo e gás, pois permite um planejamento mais eficaz da resposta a vazamentos, incluindo:

- Melhor dimensionamento da infraestrutura de resposta: Com base nas estimativas do modelo, as empresas podem dimensionar adequadamente a quantidade de recursos necessários, como embarcações de apoio e “oil

recovery”, equipamentos (skimmers, current busters, barreiras de contenção, barreiras absorventes, etc.) e pessoal envolvido nas operações de resposta, garantindo uma resposta mais rápida e eficiente.

- Gestão otimizada de resíduos: A estimativa prévia da quantidade e tipologia de resíduos (óleo recuperado, água oleosa, resíduos sólidos oleosos) permite a organização da logística de coleta, armazenamento, transporte, tratamento e disposição final, minimizando custos e riscos de impactos adicionais ao meio ambiente.
- Tomada de decisão estratégica: O modelo auxilia na escolha de estratégias de resposta mais adequadas para diferentes cenários de vazamento, considerando os volumes de resíduos gerados e a capacidade local de sua gestão.

A partir da simulação, o modelo gera uma estimativa da massa total de resíduos oleosos, subdividida em três categorias principais:

- Óleo recuperado: referente à quantidade total de óleo coletado da água por meio de materiais absorventes (mantas e barreiras) e equipamentos de recolhimento (skimmers e current busters).
- Resíduos sólidos oleosos: materiais contaminados com óleo, como mantas e barreiras absorventes usadas e EPIs descartados.
- Água oleosa: referente à água contaminada com óleo, gerada durante a coleta do óleo por skimmers e current busters e na descontaminação de equipamentos e embarcações.

É fundamental observar que o modelo desenvolvido se concentra especificamente na estimativa dos resíduos gerados pelas operações de contenção e recolhimento do óleo em suspensão na água. O modelo não aborda a estimativa de outros tipos de resíduos que podem ser gerados por outras técnicas de resposta a vazamentos de óleo, como a dispersão química ou a queima controlada, bem como de resíduos oriundo por óleo que tenha chegado à linha de costa. Essa abordagem pode vir a ser desenvolvida no futuro, ampliando o alcance dos resultados da modelagem.

A aplicação prática do modelo foi demonstrada utilizando dados do processo de licenciamento ambiental<sup>43</sup> da Enauta Energia S. A<sup>44</sup>. para o Sistema Definitivo de Produção do Campo de Atlanta. As simulações realizadas a partir do cenário de pior caso, um vazamento de 253.438 m<sup>3</sup> de óleo bruto, demonstraram a capacidade do modelo em prever, em face da infraestrutura de resposta prevista na modelagem de dispersão de óleo, a geração de 163.814,06 toneladas de água oleosa, de 126.962,23 toneladas de óleo recuperado e de 3,34 toneladas de resíduos sólidos oleosos, o que totaliza a geração de 290.779,63 toneladas de resíduos oleosos. Esses resultados reforçam a importância do modelo como ferramenta de planejamento e otimização das operações de resposta a vazamentos de óleo, contribuindo para a minimização dos impactos socioambientais e para a sustentabilidade da indústria de petróleo e gás offshore.

Tais resultados foram obtidos tendo como base os equipamentos, materiais e procedimentos previstos no Plano de Emergência Individual (PEI), bem como outras variáveis como °API do óleo, volumes de água oleosa gerada pelas ações de descontaminação, dentre vários outros parâmetros. Cabe destacar que todos os 40 parâmetros reguláveis presentes no Painel de Controle (Figura 30) do modelo são totalmente ajustáveis pelo modelador, de acordo com suas necessidades e interesses na simulação. A partir dessas informações, o modelo simula a geração diária de diferentes tipos de resíduos, considerando variáveis como:

- Volume e densidade do óleo vazado;
- Eficiência e capacidade dos equipamentos de recolhimento (skimmers, current busters);
- Quantidade e capacidade de absorção de materiais absorventes (mantas e barreiras);
- Tempo de utilização dos equipamentos e frequência de troca de EPI's.

No estudo de caso em questão, observa-se que a massa de resíduos oleosos gerada corresponderia a 117,73% da massa de óleo vazada, de 246.979,87 toneladas.

---

<sup>43</sup> Processo IBAMA nº 02001.015057/2019-47.

<sup>44</sup> Atual Brava Energia, fruto da fusão entre Enauta com a 3R Petroleum.

Em contraponto aos resultados da modelagem, a pesquisa apresenta resultados referentes aos acidentes com os petroleiros Athos 1 e Volgoneft 139 e ao afundamento da plataforma Deepwater Horizon (DWH), os quais apresentaram diferenças significativas em termos de escala, coordenação, recursos e técnicas de combate ao vazamento empregadas. O que mais chama atenção nos 3 acidentes é a falta de correlação entre as massas de óleo vazadas e suas correspondentes massas de resíduos oleosos geradas, conforme já exposto na Tabela 2 (Wadsworth, 2014), onde observa-se que os 3 acidentes foram responsáveis pela geração de resíduos oleosos respectivamente de 32%, 767% e 3.997% em relação a massas vazadas de 780.000, 900 e 2.000 toneladas. Essa ausência de correlação pode ser creditada às metodologias e recursos disponíveis à gestão de resíduos adotadas nos 3 casos, às características específicas de cada acidente e da capacitação do pessoal envolvida nas operações de resposta. O tamanho e alcance do acidente com a plataforma Deepwater Horizon tiveram o efeito de caracterizar o acidente como “Spill of National Significance (SONS)”, disponibilizando uma ampla infraestrutura já existente e contratada de instalações em vários estados para o tratamento e descarte adequado de grandes volumes de óleo recuperado, água oleosa e resíduos sólidos. Esse prévio planejamento, já existente, implantado e operacional, foram determinantes para o baixo volume de resíduos gerado.

Por sua vez, os grandes volumes de resíduos oleosos gerados nos acidentes com os petroleiros Athos 1 e Volgoneft 139 sugerem que a gestão de resíduos em ambos os acidentes pode ter enfrentado desafios, especialmente devido à falta de planejamento para lidar com grandes volumes e à escassez de infraestrutura adequada. A falta de planejamento, associada a inexistir uma prévia estimativa de massas de resíduos oleosos possível de ocorrer em caso de acidentes, poderia ter minimizado o alcance dos acidentes.

Os cenários relatados demonstram o quão relevante é a existência de uma prévia estimativa das massas de resíduos oleosos visto que resta comprovado que a magnitude dos vazamentos não está diretamente relacionada à quantidade de resíduos gerados, tornando a capacidade de estimativa prévia ainda mais crucial.

A comparação do acidente da plataforma Deepwater Horizon, e sua proporcionalmente baixa massa de resíduos oleosos gerados, com as elevadas gerações de resíduos a partir dos relativamente pequenos vazamentos dos petroleiros Athos 1 e Volgoneft 139 destaca diversos pontos sobre a importância de se considerar a geração de resíduos em operações de resposta a vazamentos de óleo:

- A resposta a um vazamento em larga escala pode gerar volumes de resíduos significativamente maiores do que o próprio volume de óleo derramado. Essa constatação exige um planejamento logístico robusto para lidar com a coleta, transporte, tratamento e disposição final adequada desses poluentes.
- As operações de resposta geram uma variedade de resíduos com diferentes características e níveis de contaminação. Essa diversidade exige a implementação de processos de segregação, tratamento e destinação específicos para cada tipo de resíduo, o que aumenta a complexidade da gestão.
- A gestão inadequada dos resíduos, incluindo armazenamento inadequado e falta de capacidade de tratamento, pode resultar em contaminação secundária do solo e de corpos hídricos, amplificando os impactos do desastre.

Em suma, os resultados comparados entre os 3 acidentes reforçam a necessidade de integrar o planejamento da gestão de resíduos como um elemento central das operações de resposta a vazamentos de óleo. A capacidade de prever a quantidade e os tipos de resíduos que serão gerados, e de mobilizar os recursos adequados para sua gestão eficiente, é essencial para minimizar os impactos socioambientais e garantir a sustentabilidade da indústria de óleo e gás offshore.

O modelo proposto representa um avanço significativo na avaliação de impactos ambientais no licenciamento ambiental da indústria de óleo e gás, ao fornecer uma estimativa prévia da geração de resíduos, permitindo uma melhor avaliação das reais necessidades da capacidade de resposta a vazamentos, possibilitando uma gestão mais eficiente e sustentável dos resíduos oleosos gerados. O modelo pode ser entendido como uma ferramenta potencial de planejamento estratégico e logístico, que permite uma melhor distribuição prévia dos recursos ao longo do litoral na área de influência de um empreendimento de óleo e gás. Esse recurso tem a capacidade não apenas de

antecipar as ações de resposta, como também na medida em que indica as prioridades, permite agilidade, efetividade e economia de recursos humanos, materiais e financeiros.

Como exposto, uma das principais preocupações relacionada à gestão de resíduos oleosos gerados durante o combate a vazamentos de petróleo é a possibilidade de os volumes de resíduos gerados serem maiores do que o próprio volume de óleo derramado, o que pode sobrecarregar a infraestrutura de resposta e gestão de resíduos disponível. Isso pode levar a atrasos ou interrupções nas operações de limpeza, aumentando os custos e os riscos de impactos ambientais adicionais. A falta de um planejamento prévio e a indisponibilidade de recursos para lidar com grandes volumes de resíduos podem agravar a situação em função da gestão inadequada dos resíduos, acarretando descarte em locais inapropriados, o que pode causar contaminação secundária e danos adicionais ao meio ambiente. A complexidade da gestão de resíduos oleosos, que envolve diferentes tipos de resíduos (óleo recuperado, água oleosa, resíduos sólidos oleosos), cada um com suas características e necessidades específicas de tratamento e disposição final, exige um planejamento detalhado e uma infraestrutura robusta.

# CONCLUSÃO

**“ Uma vida próspera pode ser sua se você puder seguir o caminho certo e mantê-lo em tudo o que pensa e faz. Duas vantagens são comuns aos deuses, aos homens e a toda alma racional: em primeiro lugar, nada externo a si mesmo tem poder de impedi-los; em segundo lugar, sua felicidade está em ter sua mente e sua conduta dispostas à justiça, e no poder de fazer disso o fim de todo desejo. ”**

Marco Aurélio – Imperador romano, Filósofo Estóico  
☆ 121 d. C. / † 180 d. C.

## CONCLUSÃO

O sistema de modelagem proposto pelo estudo se apresenta como uma ferramenta relevante para aprimorar a gestão de resíduos oleosos gerados em operações de resposta a vazamentos de petróleo offshore. Sua importância reside em diversos aspectos:

### 1. Suprir uma lacuna crítica nas Análises de Risco:

- Atualmente, os estudos de análise de risco dos licenciamento das atividades de exploração e produção de petróleo e gás natural submetidos ao IBAMA focam principalmente na modelagem da dispersão do óleo no ambiente marinho. Esses estudos não contemplam a previsão da quantidade e dos tipos de resíduos que serão gerados pelas operações de resposta.
- O sistema de modelagem proposto visa suprir essa lacuna, fornecendo uma estimativa da massa total de resíduos oleosos gerados, subdividida nas categorias de óleo recuperado, resíduos sólidos oleosos e água oleosa.

### 2. Melhorar o dimensionando da infraestrutura de resposta e gestão de resíduos

- A falta de previsão da geração de resíduos pode levar a um dimensionamento inadequado da infraestrutura de resposta, resultando na insuficiência de recursos para lidar com o volume de resíduos gerados.
- Sem uma prévia previsão das massas de resíduos oleosos que podem ser geradas, a infraestrutura existente pode se mostrar insuficiente para lidar com o volume real de resíduos, levando a gargalos logísticos e até à interrupção das operações de limpeza.
- Com as estimativas fornecidas pelo modelo, as empresas e órgãos ambientais podem planejar a capacidade de recepção, armazenamento, transporte, tratamento e disposição final dos resíduos de forma mais precisa. Isso inclui a definição da localização e capacidade de instalações de tratamento, bem como a contratação de serviços especializados.

### 3. Otimização da logística das operações de resposta:

- A gestão de grandes volumes de resíduos oleosos exige uma logística complexa e bem coordenada. Atrasos no transporte ou tratamento dos resíduos podem impactar diretamente as operações de contenção e recolhimento do óleo, prolongando o tempo de resposta e aumentando os custos.
- Conhecer previamente o volume e os tipos de resíduos esperados permite planejar rotas de transporte, definir a necessidade de embarcações e equipamentos específicos, como tanques para armazenamento de água oleosa, e alocar a força de trabalho de forma mais eficiente.
- As informações sobre a geração de resíduos, disponibilizadas pelo modelo, permitem otimizar a logística das operações. É possível planejar rotas de transporte, definir a necessidade de embarcações e equipamentos adicionais, e alocar a força de trabalho de forma mais eficiente.

### 4. Minimização dos impactos socioambientais:

- A gestão inadequada de resíduos oleosos representa um risco significativo ao meio ambiente, com potencial para causar contaminação secundária do solo e da água.
- Ao permitir a previsão da geração de resíduos, o sistema de modelagem contribui para a prevenção de impactos adicionais. O planejamento prévio da gestão de resíduos, com base em dados mais precisos, aumenta a probabilidade de que os resíduos sejam tratados e descartados de forma ambientalmente correta.

### 5. Aprimoramento da tomada de decisões:

- As informações fornecidas pelo sistema de modelagem subsidiam a tomada de decisões estratégicas e operacionais em todas as etapas da resposta a um vazamento de óleo.
- Com base nas estimativas de geração de resíduos, é possível avaliar os custos e benefícios de diferentes estratégias de resposta, otimizar o uso de recursos e garantir uma resposta mais rápida e eficiente.

- Uma logística otimizada, baseada em previsões realistas, contribui para a redução dos custos operacionais e do tempo de resposta ao vazamento, aspectos críticos em situações de emergência.

Em síntese, o sistema de modelagem proposto representa um avanço significativo para a gestão de resíduos oleosos em cenários de vazamentos de petróleo. Ao fornecer informações detalhadas sobre a geração de resíduos, o modelo permite que as empresas e órgãos ambientais se preparem de forma mais adequada para lidar com os desafios logísticos e ambientais da atividade, minimizando os impactos socioambientais e contribuindo para a sustentabilidade da indústria de petróleo e gás natural offshore.

# REFERÊNCIAS

**“ A inteligência opera quando a mente vê o todo, o todo sem fim - não o meu país, os meus problemas, meus pequenos deuses, minhas meditações. Ela vê a implicação de toda a vida. Esta qualidade de inteligência tem sua própria tremenda energia. ”**

Jiddu Krishnamurti – Filósofo e Místico Indiano  
☆ 1895 / † 1986

**REFERÊNCIAS**

- 1 Ahmed Nouh Meshref, ELSayed Abdel Fattah Ahmed Elkasaby, Ahmed Abdel Kader Mohamed Farid. Reducing construction waste in the construction life cycle of industrial projects during design phase by using system dynamics, *Journal of Building Engineering*, Volume 69, 2023, 106302, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.106302>.
- 2 Alefari, M.; Almani, M; Salonitis, K. 2020. "A System Dynamics Model of Employees' Performance" *Sustainability* 12, no. 16: 6511. <https://doi.org/10.3390/su12166511>.
- 3 Amega, K., Moumouni, Y., Lare, Y.. A System Dynamics Modelling of a Long-term Residential Electricity Consumption in Lomé, Togo. *International Journal of Energy and Power Engineering*. Vol. 10, No. 6, 2021, pp. 141-150. doi: 10.11648/j.ijepe.20211006.17.
- 4 Andrade, A.L. 1997. Pensamento Sistêmico: Um roteiro básico para perceber as estruturas da realidade organizacional. *REAd - Edição 05 Vol. 3 nº 1, mai-jun 1997*.
- 5 Anggoro, P. W., Yuniarto, T., Bawono, B., Setyohadi, D. B., Murdapa, P. S., Jamari, J. System dynamics modelling for calculation of carbon footprint on a non-homogeneous production system: A case in a ceramic studio, *Results in Engineering*, Volume 17, 2023, 100812, ISSN 2590-1230, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100812>.
- 6 Ansoff, H. I., and D. P. Slevin. 1968. An Appreciation of Industrial Dynamics. *Management Science* 14: 383-397.
- 7 Ashrafizadeh, S.; Motae, E.; Hoshyargar, V. Emulsification of heavy crude oil in water by natural surfactants. *J. Pet. Sci. Eng.* 2012, 86, 137 - 143.

- 8 Azwell, T., Blum, M. J., Hare, A., Joye, S., Kubendran, S., Laleian, A., Lane, G., Meffert, D. J., Overton, E. B., Thomas J., White, L. E., 2011. The Macondo Blowout Environmental Report. Deepwater Horizon Study Group 3. Environmental Report – January 2011.
- 9 Bacosa, H.P.; Ancla, S.M.B.; Arcadio, C.G.L.A.; Dalogdog, J.R.A.; Ellos, D.M.C.; Hayag, H.D.A.; Jarabe, J.G.P.; Karim, A.J.T.; Navarro, C.K.P.; Palma, M.P.I.; et al. From Surface Water to the Deep Sea: A Review on Factors Affecting the Biodegradation of Spilled Oil in Marine Environment. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 426. <https://doi.org/10.3390/jmse10030426>.
- 10 Barlas, Y.; Carpenter, S. (1990). Philosophical roots of model validation: two paradigms. *System Dynamics Review* 6: 148–66.
- 11 Bastos, A.A.P. (2003). *Dissertação: A Dinâmica de Sistemas e a compreensão de estruturas de negócios*. Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Zwicker. São Paulo, 2003. 135 p. *Dissertação (Mestrado em Administração)*. Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo.
- 12 Bertalanfy, L.V. (1968). *General systems theory: Foundations, development, applications (Revised Edition)*. New York: George Braziller Publishing. Disponíveis em [https://monoskop.org/images/7/77/Von\\_Bertalanffy\\_Ludwig\\_General\\_System\\_Theory\\_1968.pdf](https://monoskop.org/images/7/77/Von_Bertalanffy_Ludwig_General_System_Theory_1968.pdf).
- 13 Camilli, C.; Reddy, C.M.; Yoerger, D.; Mooy, B.V.; Jakuba, M.V.; Kinsey, J.C.; McIntyre, C.P; Sylva S.; Maloney, J.V. (2010). Tracking Hydrocarbon Plume Transport and Biodegradation at Deepwater Horizon. *Science (New York, N.Y.)*. 330. 201-4. [10.1126/science.1195223](https://doi.org/10.1126/science.1195223).
- 14 Cavana, R. Y.; Dangerfield, B. C.; Pavlov, O. V.; Radzicki, M. J.; Wheat, I. D. Editors. *Feedback Economics: Economic Modeling with System Dynamics (2021)*. Springer: Cham, Switzerland. ISBN: 978-3-030-67190-7. 593 pages. *System Dynamics*

Review vol 37, No 4 (October/December 2021): 363-366. Published online in Wiley Online Library. DOI: 10.1002/sdr.1695.

- 15 CEDRE 2024a. Centre de Documentation, de Recherche et d'Expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux, <https://wwz.cedre.fr/en/Resources/Spills/Spills/Deepwater-Horizon>, acessado em 24 de setembro de 2024.
- 16 CEDRE 2024b. Centre de Documentation, de Recherche et d'Expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux, <https://wwz.cedre.fr/en/Resources/Spills/Spills/Athos-1>, acessado em 24 de setembro de 2024.
- 17 Chen, B.; Ye, X.; Zhang, B.; Jing, L.; Lee, K. Chapter 22 - Marine Oil Spills—Preparedness and Countermeasures, Editor(s): Charles Sheppard, World Seas: An Environmental Evaluation (Second Edition), Academic Press, 2019, Pages 407-426, ISBN 9780128050521, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805052-1.00025-5>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128050521000255>).
- 18 Chen, Z.; An, C.; Chen, X.; Taylor, E.; Bagchi, A.; Tian, X. (2021). Inexact Inventory-Theory-Based Optimization of Oily Waste Management System in Shoreline Spill Response. *Sci. Total Environ.* 777, 146078. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.146078.
- 19 Coculescu, C. 2013. Possibilities Of Dynamic Systems Simulation. *Romanian Economic Business Review*, Romanian-American University, vol. 7(2), pages 319-324.
- 20 CONAMA 2008. Resolução CONAMA nº 398/2008 - Dispõe sobre o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional, originados em portos organizados, instalações portuárias, terminais, dutos, sondas terrestres, plataformas e suas instalações de apoio, refinarias, estaleiros, marinas, clubes náuticos e instalações similares, e

orienta a sua elaboração. Disponível em [http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=556](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=556).

- 21 Crone, T.J., Tolstoy, M. (2010). Magnitude of the 2010 Gulf of Mexico Oil Leak. *Science* (New York, N.Y.). 330. 634. 10.1126/science.1195840.
- 22 Dagestad, K.-F.; Röhrs, J.; Breivik, Ø.; Ådlandsvik, B. OpenDrift v1.0: A Generic Framework for Trajectory Modelling. *Geosci. Model Dev.* 2018, 11, 1405–1420. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1405-2018>.
- 23 Daling, P. S.; Aamo, O. M.; Lewis, A.; Strøm-Kristiansen, T. Sintef/Iku Oil-Weathering Model: Predicting Oils' Properties at Sea. *Int. Oil Spill Conf. Proc.* 1997, 1997, 297–307.
- 24 Daling, P. S.; Moldestad, M. Ø.; Johansen, Ø.; Lewis, A.; Rødal, J. Norwegian testing of emulsion properties at sea - The importance of oil type and release conditions. *Spill Sci. Technol. Bull.* 2003, 8, 123 - 136.
- 25 Das, N.; Chandran, P. Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: An overview. *Biotechnol. Res. Int.* 2011, 2011, 941810.
- 26 Dave, D.; Ghaly, A. E. Remediation Technologies for Marine Oil Spills: A Critical Review and Comparative Analysis. *American Journal of Environmental Sciences* 7 (5): 423-440, 2011 ISSN 1553-345X.
- 27 Deepwater Horizon Natural Resource Damage Assessment Trustees. (2016). Deepwater Horizon oil spill: Final Programmatic Damage Assessment and Restoration Plan and Final Programmatic Environmental Impact Statement. Retrieved from <http://www.gulfspillrestoration.noaa.gov/restoration-planning/gulf-plan>.

- 28 Derwisch, S.; Löwe, P. (2015). Systems dynamics modelling in industrial development evaluation. *IDS Bulletin*, 46: 44-57. <https://doi.org/10.1111/1759-5436.12120>.
- 29 Doyle, J.K.; Ford, D.N. (1998), Mental models concepts for system dynamics research. *Syst. Dyn. Rev.*, 14: 3-29. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199821\)14:1<3::AID-SDR140>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199821)14:1<3::AID-SDR140>3.0.CO;2-K).
- 30 Drivdal, M.; Broström, G.; Christensen, K. Wave-induced mixing and transport of buoyant particles: Application to the Statfjord A oil spill. *Ocean Sci.* 2014, 10, 977.
- 31 Duggan, Jim. (2016). An Introduction to System Dynamics System Dynamics Modeling with R (pp. 1-24). Cham: Springer International Publishing. DOI 10.1007/978-3-319-34043-2\_1.
- 32 ENAUTA, 2021. Plano de Emergência Individual. Sistema Definitivo do Campo de Atlanta - Bacia de Santos. APÊNDICE H – Dimensionamento da capacidade de resposta. Disponível em [https://licenciamento.ibama.gov.br/Petroleo/Producao/Producao%20-%20Bacia%20de%20Santos%20-%20SD%20Atlanta%20-%20Enauta/04\\_\\_ANX\\_IV\\_EIA\\_AneXos\\_\\_Parte\\_1.pdf](https://licenciamento.ibama.gov.br/Petroleo/Producao/Producao%20-%20Bacia%20de%20Santos%20-%20SD%20Atlanta%20-%20Enauta/04__ANX_IV_EIA_AneXos__Parte_1.pdf).
- 33 ENAUTA, 2022. Atividade de Produção - Sistema Definitivo do Campo de Atlanta, Bacia de Santos. EIA - Estudo de Impacto Ambiental. Setembro/2022, Revisão 02. Disponível em [https://licenciamento.ibama.gov.br/Petroleo/Producao/Producao%20-%20Bacia%20de%20Santos%20-%20SD%20Atlanta%20-%20Enauta/03\\_\\_ANX\\_IV\\_EIA.pdf](https://licenciamento.ibama.gov.br/Petroleo/Producao/Producao%20-%20Bacia%20de%20Santos%20-%20SD%20Atlanta%20-%20Enauta/03__ANX_IV_EIA.pdf).
- 34 ENAUTA, sd. Campo de Atlanta - Programa de Descomissionamento de Instalações (PDI) Conceitual – Sistema de Produção Antecipada (SPA). Disponível em <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e->

gas/seguranca-operacional/arq/ppdi/pdi-conceitual-spa-do-campo-de-atlanta-tarjado.pdf.

- 35 Epe Shari, B., Moumouni, Y., Momodu, A. S. Low Carbon Transition of Residential Electricity Consumption in Nigeria: A System Dynamics Modeling Approach. *International Journal of Energy and Power Engineering*. Vol. 9, No. 1, 2020, pp. 11-21. doi: 10.11648/j.ijepe.20200901.12.
- 36 Fashchuk, D. J.; Flint, M. V.; Panov, B. N.; Koluchkina, G. A. Interagency Field Research of the Consequences of the Wreck of the Tanker Volgoneft-139 in the Kerchenskii Strait. ISSN 0001-4370, *Oceanology*, 2010, Vol. 50, No. 3, pp. 434–437. Pleiades Publishing, Inc., 2010. DOI: 10.1134/S0001437010030124.
- 37 Fashchuk, D.Y. (2011). Wreck of the Tanker Volgoneft-139 in the Kerch Strait on November 11, 2007. In: *Marine Ecological Geography. Environmental Science and Engineering()*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-17444-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-17444-5_8).
- 38 Fernandes, A.C. Tese: Scorecard Dinâmico: em direção à integração da Dinâmica de Sistemas com o Balanced Scorecard. Orientador: Rogério de Aragão Bastos do Valle, D. Sc. Rio de Janeiro, 2003. 320 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). COPPE/UFRJ, 2003.
- 39 Forrester, J. W. 1958. Industrial dynamics. A major breakthrough for decision makers. *Harvard Business Review*, 37–66.
- 40 Forrester, J. W. *Industrial Dynamics*. New York, London. The MIT Press and John Willey & Sons, 1961.
- 41 Forrester, J. W. 1968. A Response to Ansoff and Slevin. *Management Science* 14: 601-618.

- 42 Forrester, J. W. 1973. *World Dynamics* Second Edition. Wright-Allen Press, Inc. 238 Main Street Cambridge, Massachusetts 02142.
- 43 Forrester, J. W.; Low, G. W.; Mass, N. J. 1974. The Debate on World Dynamics: A Response to Nordhaus. *Policy Sciences* 5: 16S190.
- 44 Forrester, J. W. 1980. Information Sources for Modeling the National Economy. *Journal of the American Statistical Association* 75: 555-574.
- 45 Forrester, J. W.; Senge, P. M. 1980. Tests for Building Confidence in System Dynamics Models. In *System Dynamics*, ed. A. A. Legasto, Jr., J. W. Forrester, and J. M. Lyneis, 201-228. *TIMS Studies in the Management Sciences*. Vol. 14. New York: North-Holland.
- 46 Forrester, J. W. (1995). The beginning of system dynamics. *The McKinsey Quarterly* (4), 4–16.
- 47 Forrester, J. W. *Designing the Future*. Universidad de Sevilla, Sevilla, España. December 15, 1998. [http://static.clexchange.org/ftp/documents/whyk12sd/Y\\_1999-03DesigningTheFuture.pdf](http://static.clexchange.org/ftp/documents/whyk12sd/Y_1999-03DesigningTheFuture.pdf).
- 48 Forrester, J. W. (2007). System dynamics, a personal view of the first fifty years. *System Dynamics Review* 23 (2-3), 345–358.
- 49 Forrester, J. W. *Some Basic Concepts in System Dynamics*, pp. 1–17, 2009.
- 50 French-McCay, D. P.; Jayko, K.; Li Z.; Spaulding, M. L.; Crowley, D.; Mendelsohn, D.; Horn, M.; Isaji, T.; Kim, Y. H.; Fontenault, J.; Rowe, J. J. Oil fate and mass balance for the Deepwater Horizon oil spill. *Marine Pollution Bulletin*, Volume 171, 2021, 112681, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112681>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X21007153>).

- 51 French-McCay DP, Spaulding ML, Crowley D, Mendelsohn D, Fontenault J and Horn M (2021) Validation of Oil Trajectory and Fate Modeling of the Deepwater Horizon Oil Spill. *Front. Mar. Sci.* 8:618463. doi: 10.3389/fmars.2021.618463.
- 52 Garbolino, E.; Chery, J. P.; Guarnieri, F. A Simplified Approach to Risk Assessment Based on System Dynamics: An Industrial Case Study. *Risk Analysis*, 2016, 36 (1), pp.16-29. ff10.1111/risa.12534ff. ffhal-01259194.
- 53 Glug, M.; Was, J. Modeling of oil spill spreading disasters using combination of Langrangian discrete particle algorithm with Cellular Automata approach. *Ocean Eng.* 2018, 156, 396 - 405.
- 54 Golden, B.; Aiguier, M.; Krob, D. Modeling of complex systems II: a minimalist and unified semantics for heterogeneous integrated systems. *Applied Mathematics and Computation* 218 (2012) 8039–8055. 2012.
- 55 Gonzalez, R. A. (2019). Reglas para el uso del Software STELLA para el proceso inicial de la Modelación Matemática y Simulación de Biorreactores. 10.13140/RG.2.2.10486.45125. Disponible em [https://www.researchgate.net/publication/333458090\\_Reglas\\_para\\_el\\_uso\\_del\\_Software\\_STELLA\\_para\\_el\\_proceso\\_inicial\\_de\\_la\\_Modelacion\\_Matematica\\_y\\_Simulacion\\_de\\_Biorreactores](https://www.researchgate.net/publication/333458090_Reglas_para_el_uso_del_Software_STELLA_para_el_proceso_inicial_de_la_Modelacion_Matematica_y_Simulacion_de_Biorreactores).
- 56 Griffiths, S. K. (2012). Oil release from Macondo well MC252 following the Deepwater Horizon accident. *Environ. Sci. Technol.* 46, 5616–5622. doi: 10.1021/es204569t.
- 57 Gundlach, E.R.; Hayes, M.O. Vulnerability of coastal environments to oil spill impacts. *Marine Technology Society Journal*. v. 12, n. 4, p. 18-27, 1978.

- 58 Hafezi, M. H.; Daisy, N. S.; Liu, L. (2022). A Cluster-Based Technique for Identifying and Grouping Oily Waste Types Generated From Marine Oil Spill Response Operations. *Front. Environ. Sci.* 10:910214. doi: 10.3389/fenvs.2022.910214.
- 59 Hajiheydari, N., Khakbaz, S. B., Ojaki, A. A. Developing Responsive Marketing System Concept: Applying System Dynamics Approach. *Science Journal of Business and Management.* Vol. 2, No. 3, 2014, pp. 91-96. doi: 10.11648/j.sjbm.20140203.11.
- 60 Houma (Houma ICP Aerial Dispersant Group). (2010). After action report: Deepwater Horizon MC252 aerial dispersant response. (TREX-013037). Retrieved from <http://www.mdl2179trialdocs.com/releases/release201501260800005/TREX-013037.pdf>.
- 61 Hupponen, M., Horttanainen, M., Luoranen, M. Oil spill waste treatment in the Kymenlaakso region after a ship accident. *Kalmar Eco-Tech 2007*, Kalmar, Sweden, november 26-28, 2007. Disponível em <https://open.lnu.se/index.php/eco-tech/article/view/2317/2091>.
- 62 IBAMA, 2013. Nota Técnica N° 03/13 - CGPEG/DILIC/IBAMA. Plano de Emergência Individual. Diretrizes para aprovação dos Planos de Emergência Individual – PEI, nos processos de licenciamento ambiental dos empreendimentos marítimos de exploração e produção de petróleo e gás natural. Disponível em <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/procedimentos-e-servicos/arquivos/petroleo-e-gas/notas-tecnicas/4-2013-03-nota-tecnica-plano-de-emergencia-individual.pdf>.
- 63 IMO/UNEP. Regional Information System; Part D – Operational Guidelines and Technical Documents, Section 12, Mediterranean Oil Spill Waste Management Guidelines, REMPEC, May 2011 (RIS/D/12). Disponível em <https://wastemanagement.rempec.org/en/assets/file/mediterranean-waste-management-decision-support-tool-may-2011.pdf/@@reset-optout>.

- 64 IOPC 2013. Incidents involving the IOPC Funds 2013. International Oil Pollution Compensation Funds. Portland House Bressenden Place London SW1E 5PN United Kingdom. [https://iopcfunds.org/wp-content/uploads/2018/12/incidents2013\\_e.pdf](https://iopcfunds.org/wp-content/uploads/2018/12/incidents2013_e.pdf).
- 65 IPIECA-IOGP, 2014. Oil spill waste minimization and management. Good practice guidelines for incident management and emergency response personnel. IOGP Report 507. London. <https://www.ipieca.org/resources/oil-spill-waste>.
- 66 IPIECA-IOGP, 2015. At-sea containment and recovery. Good practice guidelines for incident management and emergency response personnel. IOGP Report 522. London. <https://www.ipieca.org/resources/at-sea-containment-and-recovery>.
- 67 IPIECA-IOGP, 2019. Oil spill preparedness and response: An introduction - Guidance document for the oil and gas industry. IOGP Report 520. London. <https://www.ipieca.org/news/ipieca-iogp-release-2019-update-of-oil-spill-preparedness-and-response-an-introduction>.
- 68 ITOPF 2014. Fate of Marine Oil Spills 2014; The International Tanker Owners Pollution Federation Limited: London, UK, 2014.
- 69 ITOPF, 2019. Oil Tanker Spill Statistics 2018. The International Tanker Owners Pollution Federation Limited, United Kingdom, 16 pp.
- 70 ITOPF 2023. Athos 1, USA – 2004. <https://www.itopf.org/in-action/case-studies/athos-1-usa-2004>.
- 71 Ivshina, I. B.; Kuyukina, M. S.; Krivoruchko, A. V.; Elkin, A. A.; Makarov, S. O.; Cunningham, C. J.; Peshkur, T. A.; Atlas, R. M.; Philp, J. C. Oil spill problems and sustainable response strategies through new Technologies. Environ. Sci.: Processes Impacts, 2015, 17, 1201–1219. DOI: 10.1039/c5em00070j.

- 72 Johansen, Ø.; Reed, M.; Bodsberg, N.R. Natural dispersion revisited. *Mar. Pollut. Bull.* 2015, 93, 20 - 26.
- 73 Jordão da Silva, L. (2012). A Review of the Technological Solutions for the Treatment of Oily Sludges from Petroleum Refineries. *Waste Manag. Res.* 30, 106. doi:10.1177/0734242X12448517.
- 74 Kasper, H. Dissertação: O processo de pensamento sistêmico: um estudo das principais abordagens a partir de um quadro de referência proposto.214 Orientador: Luís Henrique Rodrigues, PhD. Porto Alegre, 2000. 308 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Escola de Engenharia – PPGEP – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, 2000.
- 75 Keramea, P.; Spanoudaki, K.; Zodiatis, G.; Gikas, G.; Sylaios, G. Oil Spill Modeling: A Critical Review on Current Trends, Perspectives, and Challenges. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 181. <https://doi.org/10.3390/jmse9020181>.
- 76 Kleindienst, S.; Paul, J.H.; Joye, S.B. Using dispersants after oil spills: Impacts on the composition and activity of microbial communities. *Nat. Rev. Microbiol.* 2015, 13, 388 - 396.
- 77 Komaiko, J.; Sastrosubroto, A.; McClements, D.J. Formation of oil-in-water emulsions from natural emulsifiers using spontaneous emulsification: Sunflower phospholipids. *J. Agric. Food Chem.* 2015, 63, 10078 - 10088.
- 78 Korshenko, A.; Ilyin, Y., Velikova, V. Oil spill accident in the Kerch Strait in November 2007. Edited by Alexander Korshenko, Yuriy Ilyin, Violeta Velikova. Black Sea Commission Publications 2011, Moscow, Nauka, ISBN 978-5-87317-832-2, 288 p. 2011, [http://www.blacksea-commission.org/Downloads/KerchReport\\_compressed.pdf](http://www.blacksea-commission.org/Downloads/KerchReport_compressed.pdf).

- 79 Kunc, M.; Morecroft, J. D. 2007, "System Dynamics Modelling for Strategic Development", in *Supporting Strategy: Frameworks, Methods and Models*, edited by F. O'Brien and R. Dyson, 157- 190. Chichester, United Kingdom: Wiley & Sons.
- 80 Kunc, M.; Morecroft, J. D. 2009. "Resource-Based Strategies and Problem Structuring: Using Resource Maps to Manage Resource Systems". *Journal of the Operational Research Society*, 60: 191- 199.
- 81 Kunc, M. System dynamics: a soft and hard approach to modelling. Proceedings of the 2017. Winter Simulation Conference W. K. V. Chan, A. D'Ambrogio, G. Zacharewicz, N. Mustafee, G. Wainer, and E. Page, eds. Disponível em <http://simulation.su/uploads/files/default/2017-kunc-1.pdf>.
- 82 Lane, D. C. (2007). The power of the bond between cause and effect: Jay Wright Forrester and the field of system dynamics. *System Dynamics Review* 23 (2-3), 95–118.
- 83 Lawniczak, L.; Wozniak-Karczewska, M.; Loibner, A.P.; Heipieper, H.J.; Chrzanowski, L. Microbial degradation of hydrocarbons-Basic principles for bioremediation: A review. *Molecules* 2020, 25, 856.
- 84 Leffelaar, P. A. *On Systems Analysis and Simulation of Ecological Processes with Examples in CSMP and FORTRAN*. P. A. Leffelaar (Editor). <https://doi.org/10.1007/978-94-011-2086-9>. Springer Science+Business Media Dordrecht, 1993.
- 85 Lehr, B.; Bristol, S.; Possolo, A. 2010. Oil Budget Calculator Deepwater Horizon. Technical Documentation. A Report to the National Incident Command.
- 86 Li, P., Cai, Q., Lin, W., Chen, B., Zhang, B. Offshore oil spill response practices and emerging challenges, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 110, Issue 1, 2016, Pages 6-27, ISSN 0025-326X.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.020>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X16304246>).

- 87 Li, Y.; Zhu, J.; Wang, H. The impact of different vertical diffusion schemes in a three-dimensional oil spill model in the Bohai Sea. *Adv. Atmos. Sci.* 2013, 30, 1569 - 1586.
- 88 Logeshwaran, P., Megharaj, M., Chadalavada, S., Bowman, M., Naidu, R., 2018. Petroleum hydrocarbons (PH) in groundwater aquifers: an overview of environmental fate, toxicity, microbial degradation and risk-based remediation approaches. *Environ. Technol. Innov.* 10, 175–193.
- 89 Luo, Z. Simulation of tourism carbon emissions based on system dynamics model, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Volume 129*, 2023, 103346, ISSN 1474-7065, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103346>.
- 90 Mabile, N. & Allen, A., 2010. Controlled burns - After-Action Report. Burns on May 28th-August 3, 2010. Controlled Burn Group. <http://www.mdl2179trialdocs.com/releases/release201501260800005/TREX-241730.pdf>. MacDonald, I. R., et al. (2015), Natural and unnatural oil slicks in the Gulf of Mexico, *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, 8364–8380, doi:10.1002/2015JC011062.
- 91 Makocha, I.; Toyum, E.; Gaurav, S. (2019). Deepwater Horizon Oil Spill: A Review. 5. *International Journal of Technical Innovation in Modern Engineering & Science* e-ISSN:2455-2585. Research Symposium on “Advancements in Engineering, Science, Management, and Technology”. Volume 5, Special Issue 04, April-2019.
- 92 Metcalf, S. (2014). Developing Location-based Oil Spill Waste Management Plans. *International Oil Spill Conference Proceedings*. 2014. 1633-1646. doi: 10.7901/2169-3358-2014.1.1633.

- 93 Michel, J., Fegley, S.R.; Dahlin, J.A. 2015. Deepwater Horizon Sand Beach Injury Assessment Technical Report. U NS\_TR.24). DWH Shoreline NRDA Technical Working Group Report. 111 pp + app.
- 94 Mincarone, M.M.; Abreu, T.B.; Almada, D.S.; Bauer, A.B.; Blanchette, T.G.; Camargo, G.A.; Cardoso, M.W.; Costa, R.N.; Di Dario, F.; Dias, F.C.; Fernandes, D.S.; Fischer, L.G.; Freitas, R.R.; Gestinari, L.M.S.; Gonçalves, P.R.; Konno, T.U.P.; Leal, G.F.; Mancini, P.L.; Pagliani, B.; Petry, A.C.; Rajão, H.; Ruta, C.; Esteves, F.A. 2016. Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da Bacia Marítima de Campos. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental, 84 p.
- 95 Ming-Feng H., Fang-Chen K., Chang, J. Study on Cash Flow of Volunteer Soldiers Retirement & Compensation Fund – From System Dynamics Perspective, Science Journal of Business and Management. Volume 10, Issue 1, March 2022, pp. 13-19. doi: 10.11648/j.sjbm.20221001.13.
- 96 Mirchi A, Madani K, Watkins D, Ahmad S. 2012. Synthesis of system dynamics tools for holistic conceptualization of water resources problems. Water Resour Manage (2012) 26:2421–2442 DOI 10.1007/s11269-012-0024-2.
- 97 Mishra, A.K.; Kumar, G.S. Weathering of oil spill: Modeling and analysis. Aquat. Procedia 2015, 4, 435 - 442.
- 98 Momodu, A. S., Adepoju, T. D. System Dynamics Model of the Kinetics of Biogas Production from Vegetal Matter. International Journal of Energy and Power Engineering. Vol. 9, No. 2, 2020, pp. 22-28. doi: 10.11648/j.ijepe.20200902.11.
- 99 Morgan, A. & Shaw-Brown, K. & Bellingham, I. & Lewis, A. & Pearce, M. & Pendoley, K. (2014). Global Oil Spills and Oiled Wildlife Response Effort: Implications for Oil Spill Contingency Planning. International Oil Spill Conference Proceedings. May 2014, Vol. 2014, No. 1, pp. 1524-1544. Disponível em

[https://www.researchgate.net/publication/263890695\\_Global\\_Oil\\_Spills\\_and\\_Oiled\\_Wildlife\\_Response\\_Effort\\_Implications\\_for\\_Oil\\_Spill\\_Contingency\\_Planning](https://www.researchgate.net/publication/263890695_Global_Oil_Spills_and_Oiled_Wildlife_Response_Effort_Implications_for_Oil_Spill_Contingency_Planning).

- 100 Moumouni, Y., Ahmad, S., Jacob Baker, R. A System Dynamics Model for Energy Planning in Niger. *International Journal of Energy and Power Engineering*. Vol. 3, No. 6, 2014, pp. 308-322. doi: 10.11648/j.ijepe.20140306.14.
- 101 Mupfumira, P., Wirjodirdjo, B. An Economically Sustainable Urban Public Transport Framework: System Dynamics Modelling Approach to Reduce Public Transport Liberalisation Impact in Harare City. *International Journal of Science, Technology and Society*. Special Issue: Design Innovations for Sustainable Development. Vol. 3, No. 2-2, 2015, pp. 11-21. doi: 10.11648/j.ijsts.s.2015030202.13.
- 102 Musse, J.O. Tese: Backcasting e Dinâmica de Sistemas como instrumentos para criar conhecimento em sistemas complexos, visando à tomada de decisão. Orientador: Prof. Dr. Gregório Jean Varvakis Rados. Florianópolis, 2010. 387 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Gestão do Conhecimento). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Gestão do Conhecimento.
- 103 Naimi, B.; Voinov, A. StellaR: A software to translate Stella models into R open-source environment, *Environmental Modelling & Software*, Volume 38, 2012, Pages 117-118, ISSN 1364-8152, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.05.012>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815212001673>).
- 104 NAS. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2022. *Oil in the Sea IV: Inputs, Fates, and Effects*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26410>.
- 105 National Research Council. 2003. *Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/10388>.

- 106 Nixon, Z.; Zengel, S.; Baker, M.; Steinhoff, M.; Fricano, G.; Rouhani, S.; Michel, J. Shoreline oiling from the Deepwater Horizon oil spill, *Marine Pollution Bulletin*, Volume 107, Issue 1, 2016, Pages 170-178, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.04.003>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X16302016>).
- 107 NOAA 2023. Oil Spills and the Holidays: Black Friday Takes a New Meaning. <https://response.restoration.noaa.gov/about/media/oil-spills-and-holidays-black-friday-takes-new-meaning.html>.
- 108 NOAA 2024. M/T Athos I. Oil Spill - Delaware River, New Jersey - November 2004. <https://darrp.noaa.gov/oil-spills/mt-athos-i>.
- 109 Nordhaus, W. D. 1973. World Dynamics: Measurement Without Data. *Economic Journal* 83: 1156-1183.
- 110 Oldenburg, C. M., Freifeld, B. M., Pruess, K., Pan, L., Finsterle, S., Moridis, G. J. Numerical simulations of the Macondo well blowout reveal strong control of oil flow by reservoir permeability and exsolution of gas. 20254–20259 | *PNAS* | December 11, 2012 | vol. 109 | no. 50.
- 111 Oudhuis, M., Tengblad, S. (2018). BP and Deepwater Horizon: A Catastrophe from a Resilience Perspective. In: Tengblad, S., Oudhuis, M. (eds) *The Resilience Framework. Work, Organization, and Employment*. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-5314-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-10-5314-6_5).
- 112 Ouyang, Y. Leininger, T. D., Hatten, J., Parajuli, P. B. A STELLA Model to Estimate Soil CO<sub>2</sub> Emissions from a Short-Rotation Woody Crop. *Water Air Soil Pollut* 224, 1392 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1392-1>.

- 113 Paine, R.T., Ruesink, L., Sun, A., Soulanille, E.L., Wonham, M.J., et al., 1996. Trouble on oiled waters: lessons from the Exxon Valdez oil spill. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 27, 197–235.
- 114 Payne, J.R.; Clayton, J.R.; Kirstein, B.E. Oil/Suspended Particulate Material Interactions and Sedimentation. *Spill Sci. Technol. Bull.* 2003, 8, 201 - 221.
- 115 Payne-Sturges, D. C., Ballard, E., Cory-Slechta, D. A., Thomas, S. B., Hovmand, P. Making the invisible visible: Using a qualitative system dynamics model to map disparities in cumulative environmental stressors and children's neuro development, *Environmental Research*, Volume 221, 2023, 115295, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115295>.
- 116 POSOW. Preparedness for Oil-polluted Shoreline cleanup and Oiled Wildlife interventions – Oil Spill Waste Management Manual. 2016. <https://www.posow.org/documentation/wasteweb.pdf>.
- 117 Pruyt, E., 2013. *Small System Dynamics Models for Big Issues: Triple Jump towards Real-World Complexity*. Delft: TU Delft Library. 324p.
- 118 Rahsepar, S.; Smit, M.P.J.; Murk, A.J.; Rijnaarts, H.H.M.; Langenhoff, A.A.M. Chemical dispersants: Oil biodegradation friend or foe? *Mar. Pollut. Bull.* 2016, 108, 113 - 119.
- 119 Reed, M.; Daling, P.; Lewis, A.; Ditlevsen, M.K.; Brørs, B.; Clark, J.; Aurand, D. Modelling of Dispersant Application to Oil Spills in Shallow Coastal Waters. *Environ. Model. Softw.* 2004, 19, 681–690.
- 120 Rehan, R.; Knight, M.A.; Haas, C.T.; Unger, A.J.A. Application of system dynamics for developing financially self-sustaining management policies for water and wastewater systems, *Water Research*, Volume 45, Issue 16, 2011, Pages 4737-4750, ISSN 0043-1354, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.06.001>.

- 121 REMPEC (2010). "Guidelines on Oil Spill Waste Management," in Mediterranean Technical Working Group (MTWG) Programme. Editors F. Poncet and L. PageJones. Disponível em <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionResponse/Documents/Oil%20spill%20waste%20management%20decision%20support%20tool.pdf>.
- 122 Richardson, G. P.; Pugh, A. L. III. 1981. Introduction to System Dynamics Modeling with DYNAMO. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- 123 Rodriguez Lara, D. V., Pfaffenbichler, P., Rodrigues da Silva, A. N. Modeling the resilience of urban mobility when exposed to the COVID-19 pandemic: A qualitative system dynamics approach, *Sustainable Cities and Society*, Volume 91, 2023, 104411, ISSN 2210-6707, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104411>.
- 124 Röhrs, J.; Dagestad, K.-F.; Asbjørnsen, H.; Nordam, T.; Skancke, J.; Jones, C.E.; Brekke, C. The Effect of Vertical Mixing on the Horizontal Drift of Oil Spills. *Ocean Sci.* 2018, 14, 1581–1601. <https://doi.org/10.5194/os-14-1581-2018>.
- 125 Ruth, M., Lindholm, J. (2002). Modeling in STELLA. In: Ruth, M., Lindholm, J. (eds) *Dynamic Modeling for Marine Conservation. Modeling Dynamic Systems*. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0057-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0057-1_2).
- 126 Schoenenberger, L.; Schmid, A.; Tanase, R.; Beck, M.; Schwaninger, M. Structural Analysis of System Dynamics Models, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Volume 110, 2021, 102333, ISSN 1569-190X, <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102333>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X21000514>)
- 127 SAT (Shoreline Assessment Team) 2007. Final report. Shoreline injury assessment. M/T Athos I oil spill. <https://pub-data.diver.orr.noaa.gov/admin-record/6404/Shoreline%20Injury%20Assessment.pdf>.

- 128 Schwaninger, M., Groesser, S. (2018). System Dynamics Modeling: Validation for Quality Assurance. In: Meyers, R. (eds) Encyclopedia of Complexity and Systems Science. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5\\_540-4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5_540-4).
- 129 Saleem, S.; Hu, G.; Li, J.; Hewage, K.; Sadiq, R. Evaluation of offshore oil spill response waste management strategies: A lifecycle assessment-based framework, Journal of Hazardous Materials, Volume 432, 2022, 128659, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128659>.  
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389422004484>).
- 130 Sannino, F.A. Dissertação: A Dinâmica em um Projeto de Tecnologia de Grande Porte. Orientador: Silvio Hamacher. Rio de Janeiro, 2006. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial). PUC, Departamento de Engenharia Industrial, 2006.
- 131 Santos, A. C. K.; Cho, Y.; Araujo, I. S.; Gonçalves, G. P. Some possibilities of using the principles of Forrester systems in Physics topics, through the STELLA quantitative modeling tool. Cad. Cat. Ens. Fís., v. 17, n. 1: p. 81-95, abr. 2000.
- 132 Sayama, H. Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems. State University of New York at Binghamton. ISBN 13: 9781942341093. 2015. Disponível em <https://knightscholar.geneseo.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1013&context=oer-ost>.
- 133 Sharif, S. V., Moshfegh, P. H., Morshedi, M. A., Kashani, H. Modeling the impact of mitigation policies in a pandemic: A system dynamics approach, International Journal of Disaster Risk Reduction, Volume 82, 2022, 103327, ISSN 2212-4209, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103327>.

- 134 Siegenfeld, A. F.; Bar-Yam, Y. An Introduction to Complex Systems Science and Its Applications, Complexity, 2020, 6105872, 16 pages, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/6105872>.
- 135 Simecek-Beatty, D.; Lehr, W.J. Extended oil spill spreading with Langmuir circulation. Mar. Pollut. Bull. 2017, 122, 226 - 235.
- 136 Simoneto, E. O.; Lobler, M. L. Simulation based on system dynamics to evaluate scenarios about the generation and disposal of municipal solid waste. African Journal of Business Management Vol. 6(50), pp. 11976-11985, 19 December, 2012.
- 137 Smith, J.B. A Technical Report on Complex Systems. Department of Computing Sciences Villanova, University Villanova, Pennsylvania, 2002. U.S.A.
- 138 Smith, L. C., Smith, M., Ashcroft, P. Analysis of Environmental and Economic Damages from British Petroleum's Deepwater Horizon Oil Spill. Albany Law Review, Vol. 74, No. 1, 2011: 563-585. Disponível em <https://ssrn.com/abstract=1653078> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1653078>.
- 139 Spaulding, M.L. A state-of-the-art review of oil spill trajectory and fate modeling. Oil Chem. Pollut. 1988, 4, 39 - 55.
- 140 Sterman, J. Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. Copyright 2000 The McGraw-Hill Companies. ISBN-13:978-0-07-231135-8.
- 141 Sussman, J.M. Collected Views on Complexity in Systems. Massachusetts Institute of Technology. Engineering Systems Division. Working Paper Series ESDWP-2003-01.06. 2002.
- 142 Tklich, P.; Chan, E.S. Vertical mixing of oil droplets by breaking waves. Mar. Pollut. Bull. 2002, 44, 1219 - 1229.

- 143 UNEP 2008. Oil Spill in the Kerch Strait - Ukraine Post-Disaster Needs Assessment. European Commission United Nations Environment Programme. ISBN: 978-92-807-2958-0. <https://www.unep.org/resources/report/oil-spill-kerch-strait-ukraine-post-disaster-needs-assessment>.
- 144 USCG (U.S. Coast Guard), 2005a. T/S Athos I. Evaluation Report. <https://pub-data.diver.orr.noaa.gov/admin-record/6404/USCG%202005b.pdf>.
- 145 USCG (U.S. Coast Guard), 2005b. Delaware River Oil Spill. Delaware river oil spill update #21. <https://pub-data.diver.orr.noaa.gov/admin-record/6404/USCG%202005a.pdf>.
- 146 USCG (U.S. Coast Guard), 2010a. U. S. Department of Homeland Security. Claim Number P05005-0C1- Athos I Oil Spill Assessment and Restoration. [https://pub-data.diver.orr.noaa.gov/admin-record/6404/DE\\_TV\\_Athos\\_I\\_CD\\_NPFC\\_Determination\\_2010.pdf](https://pub-data.diver.orr.noaa.gov/admin-record/6404/DE_TV_Athos_I_CD_NPFC_Determination_2010.pdf).
- 147 USCG (U.S. Coast Guard), 2010b. National Incident Commander's Report: MC252 Deepwater Horizon. United States Coast Guard National Incident Command. October 1, 2010. Disponível em <https://www.nrt.org/sites/2/files/DWH%20NIC.pdf>.
- 148 USCG (U.S. Coast Guard), 2011. On scene coordinator report: Deepwater Horizon oil spill. Washington, DC. U.S. Department of Homeland Security, U.S. Coast Guard. Submitted to the National Response Team. Disponível em [http://www.uscg.mil/foia/docs/dwh/fosc\\_dwh\\_report.pdf](http://www.uscg.mil/foia/docs/dwh/fosc_dwh_report.pdf).
- 149 USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) 2011. EPA Should Clarify and Strengthen Its Waste Management Oversight Role With Respect to Oil Spills of National Significance Report No. 11-P-0706 September 26, 2011. <https://www.epaoig.gov/sites/default/files/2015-10/documents/20110926-11-p-0706.pdf>.

- 150 USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) 2013. Office of Solid Waste and Emergency Response. Lessons Learned with regard to Waste Management during the Deepwater Horizon Oil Spill. [https://www.nrt.org/sites/114/files/3900%20Waste %20mgmt%20lessons%20DWH%20EPA%202013-05.pdf](https://www.nrt.org/sites/114/files/3900%20Waste%20mgmt%20lessons%20DWH%20EPA%202013-05.pdf).
- 151 Vemuri, V. Modeling of complex systems. Academic Press, Inc. Q295.V45 003 77-77246 ISBN 0-12-716550- 9. 1978.
- 152 Verma, P.; Wate, S.R.; Devotta, S. Simulation of impact of oil spill in the ocean – a case study of Arabian Gulf. *Environ Monit Assess* 146, 191–201 (2008). <https://doi.org/10.1007/s10661-007-0071-y>.
- 153 Wadsworth, T. 2014 International Oil Spill Conference. Comparison and Assessment of Waste Generated During Oil Spills. ITOPF Ltd., 1 Oliver’s Yard, 5 City Road London EC1Y 1Hq, United Kingdom.
- 154 Ward, C.P.; Overton, E.B. How the 2010 Deepwater Horizon spill reshaped our understanding of crude oil photochemical weathering at sea: A past, present, and future perspective. *Environ. Sci. Process. Impacts* 2020, 22, 1125 - 1138.
- 155 Zafirakou, A. Oil Spill Dispersion Forecasting Models. In *Monitoring of Marine Pollution*; IntechOpen: London, UK, 2018.
- 156 Zellner, A. 1980. Comment on Forrester’s “Information Sources for Modeling the National Economy.” *Journal of the American Statistical Association* 75: 567-509.
- 157 Zhihong,L., Xueping, L., Ming, S. A Study on the Effect of Telecom Terminal Customization Service Strategy on Conversion Tendency Based on the System Dynamics. *Science Innovation*. Vol. 2, No. 3, 2014, pp. 27-36. doi: 10.11648/j.si.20140203.12.

- 158 Zuckerman O. (2004): System blocks: Learning about systems concepts through hands-on modeling and simulation. MA Thesis, MIT, Cambridge, MA, <https://www.media.mit.edu/publications/system-blocks-learning-about-systems-concepts-through-hands-on-modeling-and-simulation/>.

# APÊNDICES

**“ Por que vos preocupais com o vestuário? Olhai como crescem os lírios do campo! Não trabalham nem fiam. Pois Eu vos digo: Nem Salomão, em toda a sua magnificência, se vestiu como qualquer deles. Ora, se Deus veste assim a erva do campo, que hoje existe e amanhã é lançada ao fogo, como não fará muito mais por vós, homens de pouca fé? ”**

Jesus Cristo – Salvador da Humanidade

☆ 8-4 a.C / † 29-36 d.C.

## APÊNDICES

Apêndice 1: material absorvente.

MATERIAL ABSORVENTE			
Empresa	Mantas absorventes	Links	
EcoResponse	<b>40 cm x 50 cm x 9 mm</b>	<a href="https://loja.ecoresponse.com.br/manta-absorvente-oleo-40cmx50cmx9mm">https://loja.ecoresponse.com.br/manta-absorvente-oleo-40cmx50cmx9mm</a>	
	Peso		Absorção de óleo
	0,075 kg		1,35 kg
	0,000075 ton		0,00135 ton
	<b>40 cm x 50 cm x 4 mm</b>	<a href="https://loja.ecoresponse.com.br/manta-absorvente-oleo-40cmx50cmx4mm">https://loja.ecoresponse.com.br/manta-absorvente-oleo-40cmx50cmx4mm</a>	
	Peso		Absorção
	0,055 kg		0,99 kg
	0,000055 ton		0,00099 ton
	<b>40 cm x 50 cm x 2 mm</b>	<a href="https://loja.ecoresponse.com.br/manta-absorvente-oleo-40cmx50cmx2mm">https://loja.ecoresponse.com.br/manta-absorvente-oleo-40cmx50cmx2mm</a>	
	Peso		Absorção de óleo
	0,035 kg		0,63 kg
	0,000035		0,00063
		<b>Barreiras absorventes</b>	<b>Links</b>
		<b>3 m x 20 cm</b>	<a href="https://loja.ecoresponse.com.br/barreira-absorvente-3mx20cm">https://loja.ecoresponse.com.br/barreira-absorvente-3mx20cm</a>
	Peso	Absorção de óleo	
	2 kg	36 kg	
	0,002 ton	0,036 ton	
		<b>3 m x 12,5 cm</b>	<a href="https://loja.ecoresponse.com.br/barreira-absorvente-3mx125cm">https://loja.ecoresponse.com.br/barreira-absorvente-3mx125cm</a>
	Peso	Absorção de óleo	
	1,5 kg	27 kg	
	0,0015 ton	0,027 ton	
	<b>Travesseiros absorventes</b>	<b>Links</b>	
	<b>45 cm x 45 cm x 5 cm</b>	<a href="https://loja.ecoresponse.com.br/travesseiro-absorvente-oleo-45cmx45cmx5cm">https://loja.ecoresponse.com.br/travesseiro-absorvente-oleo-45cmx45cmx5cm</a>	
Peso	Absorção de óleo		
0,2 kg	3,6 kg		
0,0002 ton	0,0036 ton		
	<b>23 cm x 23 cm x 5 cm</b>	<a href="https://loja.ecoresponse.com.br/travesseiro-absorvente-oleo-23cmx23cmx5cm">https://loja.ecoresponse.com.br/travesseiro-absorvente-oleo-23cmx23cmx5cm</a>	
Peso	Absorção de óleo		
0,06 kg	1,08 kg		
0,00006 ton	0,00108		

## Apêndice 2: EPI - botas.

BOTAS		
Empresa	Peso (par)	Links
Bracol	1,030 kg	<a href="https://bracol.pro/uploads/2532/490293164/ficha%20tecnica%2091LPUC600-%2040724212.pdf">https://bracol.pro/uploads/2532/490293164/ficha%20tecnica%2091LPUC600-%2040724212.pdf</a>
	1,564 kg	<a href="https://bracol.pro/uploads/2532/produtos/acquaflex_curto_branca_forrada/ficha-tecnica-82bpc600-80000042.pdf">https://bracol.pro/uploads/2532/produtos/acquaflex_curto_branca_forrada/ficha-tecnica-82bpc600-80000042.pdf</a>
	1,614 kg	<a href="https://bracol.pro/uploads/2532/NOVAS%20FICHAS%20BOTA%20PU/40724154%20T.pdf">https://bracol.pro/uploads/2532/NOVAS%20FICHAS%20BOTA%20PU/40724154%20T.pdf</a>
	1,776 kg	<a href="https://bracol.pro/uploads/2532/produtos/puresafe_branco/ficha-tecnica-91fpul100-490491483.pdf">https://bracol.pro/uploads/2532/produtos/puresafe_branco/ficha-tecnica-91fpul100-490491483.pdf</a>
	1,938 kg	<a href="https://bracol.pro/uploads/2532/acqualev/puresafe/ficha%20tecnica%2091FPUL102%20-%20490491572.pdf">https://bracol.pro/uploads/2532/acqualev/puresafe/ficha%20tecnica%2091FPUL102%20-%20490491572.pdf</a>

## Apêndice 3: EPI - macacões.

MACACÕES									
Empresa	Tamanho	Altura (cm)	Média	Peitoral (cm)	Média	m <sup>2</sup>	Gramatura (g/m <sup>2</sup> )	Peso (g)	Links
Kalipso	P	165-169	167	82-89	85,5	1,43	50	71,39	<a href="https://kalipso.com.br/produtos/detalhes/144/macacao-de-protecao-kt6">https://kalipso.com.br/produtos/detalhes/144/macacao-de-protecao-kt6</a>
	M	170-174	172	90-97	93,5	1,61	50	80,41	
	G	175-179	177	98-105	101,5	1,80	50	89,83	
	XG	180-184	182	106-113	109,5	1,99	50	99,65	
	XXG	185-189	187	114-121	117,5	2,20	50	109,86	
Dupont	P	162-170	166	84-92	88	1,46	50	73,04	<a href="https://www.safespec.dupont.com.br/content/dam/dupont/amer/us/en/personal-protection/public/documents/pt/IFU_Tychem_Brazil.pdf">https://www.safespec.dupont.com.br/content/dam/dupont/amer/us/en/personal-protection/public/documents/pt/IFU_Tychem_Brazil.pdf</a>
	M	168-176	172	92-100	96	1,65	50	82,56	
	G	174-182	178	100-108	104	1,85	50	92,56	
	XG	180-188	184	108-116	112	2,06	50	103,04	
	XXG	186-194	190	116-124	120	2,28	50	114,00	
	XXXG	192-200	196	124-132	128	2,51	50	125,44	

## Apêndice 4: EPI - luvas.

LUVAS		
Empresa	Luvas (par)	Links
Danny	27 cm - 0,197 kg	<a href="https://www.danny.com.br/public/files/ficha_tecnica_petronit_verde_da12210d_da12214d_da12214.pdf">https://www.danny.com.br/public/files/ficha_tecnica_petronit_verde_da12210d_da12214d_da12214.pdf</a>
	35 cm - 0,256 kg	
	45 cm - 0,329 kg	

## Apêndice 5: tripulações de embarcações PSV, AHTS e OSRV e capacidade de recuperação de óleo.

EMPRESA	EMBARCAÇÃO	TRIPULAÇÃO	RECOVERY OIL	
CBO	CBO Alessandra	27	-	
	CBO Aliança	24	-	
	CBO Ana Luisa	27	-	
	CBO Anita	27	-	
	CBO Anna Gabriella	18	-	
	CBO Arpoador	24	-	
	CBO Atlântico	24	-	
	CBO Bianca	27	-	
	CBO Carolina	27	-	
	CBO Copacabana	24	-	
	CBO Delta Commander	26	-	
	CBO Energy	60	-	
	CBO Flamengo	24	-	
	CBO Ipanema	24	-	
	CBO Itajaí	24	-	
	CBO Oceana	24	-	
	CBO Pacífico	24	-	
	CBO Rem Mistral	23	-	
	CBO Renata	27	-	
	CBO Siddis Sailor	48	-	
	CBO Supporter	25	-	
	CBO Valentina	18	-	
	CBO Wiser	60	-	
	<b>Link: <a href="https://www.grupocbo.com.br/pt-br/embarcacoes/psv">https://www.grupocbo.com.br/pt-br/embarcacoes/psv</a></b>			
	AHTS	AH Camogli	29	-
		AH Giorgio P	38	-
AH Liguria		31	-	
AH Valletta		36	-	
AH Varazze		38	-	
CBO Bossa Nova		34	-	

		CBO Cabrália	34	-
		CBO Chiara	30	-
		CBO Endeavour	40	1371,6 m <sup>3</sup>
		CBO Iguaçu	34	-
		CBO Parintins	34	-
		CBO Terra Brasilis	34	-
		CBO Xavantes	34	-
		<b>Link: <a href="https://www.grupocho.com.br/pt-br/embarcacoes/ahts">https://www.grupocho.com.br/pt-br/embarcacoes/ahts</a></b>		
	OSRV	CBO Niterói	21	781,5 m <sup>3</sup>
		CBO Rio	21	772,2 m <sup>3</sup>
		CBO Vitória	18	991,4 m <sup>3</sup>
		<b>Link: <a href="https://www.grupocho.com.br/pt-br/embarcacoes/osrv">https://www.grupocho.com.br/pt-br/embarcacoes/osrv</a></b>		