

## **RELATÓRIO SOBRE A MODELAGEM DE ÁGUA PRODUZIDA DO CAMPO DE ALBACORA LESTE**

### **1. APRESENTAÇÃO**

O presente relatório apresenta a modelagem da dispersão da descarga da água produzida no campo de Albacora Leste, considerando os aspectos da natureza operacional da atividade.

### **2. INTRODUÇÃO**

#### **2.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE A ÁGUA PRODUZIDA**

Conforme apresentado anteriormente no Capítulo 3 deste EIA, o plano de desenvolvimento do Sistema de Produção do Campo de Albacora Leste prevê um fluxo de água produzida ao longo do período de exploração do seu reservatório, que chega a valores significativos a partir de 2007 (457,5 m<sup>3</sup>/dia), aumentando seu volume gradativamente, de acordo com a evolução da produção, até um máximo de 21.315,10 m<sup>3</sup>/dia no ano de 2021 e depois oscilando entre 21.000 e 22.000 m<sup>3</sup>/dia até o último ano (2025).

Os valores de água produzida no desenvolvimento do campo permitem agrupar suas vazões em três estágios diferentes:

1. de 2007 a 2010 (4 anos) : quando os valores vão de 457,50 m<sup>3</sup>/dia até 8.013,70 m<sup>3</sup>/dia;
2. de 2011 a 20115 (5 anos) : quando os valores passam dos 10.000 m<sup>3</sup>/dia, variando de 9.983,60 m<sup>3</sup>/dia até 16.997,30 m<sup>3</sup>/dia; e
3. de 2016 a 2025 (10 anos) : quando os valores estabilizam em cerca de 20.000 m<sup>3</sup>/dia, indo de 18.429,0 m<sup>3</sup>/dia a 22.315,1 m<sup>3</sup>/dia.

Estes agrupamentos foram utilizados de forma categorizar os efeitos do lançamento do efluente no meio, caracterizando melhor cada uma destas etapas e sua extensão no meio, favorecendo a otimização dos esforços de sua observação e monitoramento.

A água produzida é o principal resíduo gerado nas atividades de produção de petróleo e gás *offshore*, oriunda do processo produtivo do composto trifásico (gás, óleo e água). Em águas profundas, este resíduo é quase sempre descartado ao mar pelas operadoras, após tratamento, conforme descrito nos itens 3.2.3.b e 3.8. Observa-se que a eficiência do tratamento da água produzida está relacionada diretamente aos seus volumes produzidos.

A água produzida, também chamada de salmoura (EPA, 1997), pode incluir a água de injeção utilizada na recuperação secundária do reservatório (como no caso destes poços), a água de formação (ou aquífero, gerada no reservatório junto com o óleo em condições de alta pressão e temperatura), além dos químicos utilizados tanto no poço (principalmente anti-corrosivos e biocidas), quanto no processo de separação água/óleo (demulsificantes).

No Sistema de Produção do Campo de Albacora Leste, serão separados no FPSO P-50, os 3 produtos oriundos do reservatório, sendo que a água de produção será tratada em planta específica (item 3.2.3.b deste documento) a fim de garantir o baixo impacto do descarte no oceano, de acordo com o exigido na legislação brasileira.

De acordo com Thomas *et al.* (2001), a quantidade de água produzida gerada varia em função de uma série de fatores, destacando-se as características do reservatório, a idade dos poços produtores e os métodos de recuperação utilizados (volume de água injetada na recuperação secundária). Nas atividades de produção, a água produzida corresponde a cerca de 98% de todos os resíduos gerados pela atividade.

Em termos de regulamentação, no Brasil aplica-se a Resolução CONAMA Nº 20 de 1986, que trata do descarte de efluentes de fontes poluidoras em águas interiores e marinhas. Segundo esta resolução, todo resíduo para ser lançado direta ou indiretamente em um corpo d'água deve apresentar concentração de óleo igual ou inferior a 20 ppm e temperatura igual ou inferior a 40°C. Por outro lado, não existe uma regulamentação específica que reja o descarte de água produzida em operações *offshore* no mar territorial brasileiro.

Os principais fatores oceanográficos que determinam o grau de diluição são a profundidade da lâmina d' água e o hidrodinamismo da região, considerando principalmente o regime de correntes e, em menor atuação, os ventos. Desta forma, regiões de grandes profundidades e de grande dinamismo são favoráveis ao descarte da água produzida, não gerando conseqüências sensíveis ao ambiente.

De acordo com a Chevron (1997), o poder de diluição do oceano receptor é muito grande, sendo a descarga diluída de 1:50 em 100m do ponto de descarte, sendo a mistura função do volume, temperatura e densidade da água descartada, além da profundidade e dinamismo local.

Entretanto, em regiões de grande produtividade petrolífera (como a Bacia de Campos), os valores de *background* para alguns parâmetros físico-químicos podem se mostrar alterados (metais pesados, HPAs, sulfetos, etc.), devido principalmente ao efeito sinérgico da produção dos diversos campos próximos.

Segundo a GESAMP (1993), a composição química e o grau de diluição da água produzida fazem com que o impacto da água descartada seja significativo apenas em áreas continentais, não sendo representativo em águas oceânicas. Esta avaliação é corroborada por Thomas *et al.* (2001), que sugere que a descarga contínua de água produzida não causa danos consideráveis ao ambiente marinho, desde que o sistema de descarte garanta uma diluição rápida e efetiva do efluente.

## **2.2. O MODELO OOC (OFFSHORE OPERATORS COMMITTEE)**

“O modelo do Comitê de Operadores Offshore para Fluidos de Perfuração e Água Produzida, conhecido como ‘OOC Model’ é um programa computacional para o cálculo do comportamento do fluido, dos cascalhos de perfuração ou do descarte da água produzida

no ambiente marinho. Em um contrato firmado entre a Exxon Company USA e o Comitê, a Exxon Production Research Company (EPR) desenvolveu a modelagem de dispersão do fluido de perfuração e de descarte de água produzida, entregando-os, em 1983, com um relatório descritivo, o qual continha um guia para o usuário do programa desenvolvido.

Desde esta data, o modelo para descarte de água produzida, bem como melhoria sucessivas no modelo de fluidos/cascalhos, vêm sendo implementados e disponibilizados para os membros do Comitê pela Brandsma Engenharia. Em 1999, os modelos foram acoplados e, juntamente com o relatório revisado, foram disponibilizados ao Comitê.” (EPRC, 1999).

O modelo é usado para simulações numéricas do comportamento de descargas a partir de um único ponto com diâmetro circular submerso, orientado para qualquer direção. A taxa de vazão desta descarga é assumida como constante. O efluente descartado é modelado como uma série de fluidos miscíveis à água que contêm partículas que podem ser mais pesadas (cascalhos) ou mais leves (gotas de óleo) que o fluido ambiente. Este fluido ambiente, chamado doravante de corpo receptor, é descrito pela sua profundidade local, temperatura, salinidade e velocidade da corrente.

As saídas do modelo são compostas dos cálculos de trajetória e forma da pluma feita pela descarga, as concentrações dos seus componentes solúveis e insolúveis na coluna d’água e nos seus acúmulos nas interfaces (superfície para as partículas leves e fundo para as partículas pesadas). O modelo prevê tridimensionalmente as concentrações na coluna d’água como função do tempo decorrido após o início da descarga, considerando as interfaces citadas como reservatórios de retirada de material do sistema, não contribuindo como fontes.

Os dados da batimetria do local modelado e os campos de correntes podem ser uniformes ao longo da simulação ou variarem espacialmente no grid escolhido.

### **3. ASPECTOS DA MODELAGEM REALIZADA**

#### **3.1 DESCRIÇÃO GERAL DO DESENVOLVIMENTO DA PLUMA DA DESCARGA**

O modelo assume que a descarga da água produzida a partir de uma tubulação submersa no mar local, orientada para qualquer direção, irá gerar um jato simples. Este mar local estará caracterizado por uma estratificação de densidade e um campo de correntes, enquanto que a água produzida deverá possuir uma tendência maior ou menor à boiar e uma orientação (para baixo ou para cima), o que definirá o seu movimento descendente ou ascendente.

Após a descarga, a água produzida passará por três estágios de fluxo:

1. Fase de jato (ou convectiva) – onde o fluido transportado é dominado pelo momento da descarga inicial e o prevalemento das forças de coesão internas sobre as forças de arrasto. É caracterizado pela maior manutenção nas características da água produzida, tentando manter sua integridade e com poucas trocas com o meio ao redor.

2. Fase do colapso dinâmico – onde a água produzida procura uma profundidade de equilíbrio e onde a advecção, diferenças de densidade e os contrastes entre seus gradientes são as principais forças direcionando o seu transporte. O colapso refere-se a perda de integridade da água de produção, sendo o momento onde a penetração de água do mar se inicia, causando mistura e diluição na descarga da água produzida.

3. Fase de dispersão passiva – onde a água produzida já perdeu completamente as suas características dinâmicas e todo o transporte das partículas é determinado por processos de difusão e advecção. Não há identificação da água produzida como um efluente, estando ela completamente misturada e diluída.

Os coeficientes de dispersão não são tão comuns na literatura, o que induziu a que o modelo realizasse suas próprias estimativas (Koh e Fan, 1970, apud EPRC, 1999):

- coeficientes horizontais : baseados na aplicação da lei de potência quatro terços para a escala de comprimento do efeito; e
- coeficientes verticais : baseado no estado do mar e no perfil de densidade do ambiente, sendo neste caso função das condições das ondas.

### 3.2 DADOS DE ENTRADA DA SIMULAÇÃO

O modelo utiliza um sistema próprio de coordenadas, devendo ser indicada a extensão da área avaliada ao longo dos eixos E-W e N-S, bem como os intervalos de discretização da malha nos quais são calculados os parâmetros avaliados na evolução da modelagem. São informados também os seguintes parâmetros :

- Composição da água produzida: temperatura, salinidade e concentração de óleo;
- Dados da descarga: vazão, duração, raio da tubulação, orientação e localização;
- Dados do ambiente: batimetria, perfil de velocidades de correntes, altura e período de onda, velocidade do vento e temperatura do ar; e
- Dados estruturais do FPSO P-50: comprimento, largura, calado operacional, diâmetro característico das estruturas submersas e espaçamento entre elas.

Todos os dados são apresentados em unidades do sistema inglês, o que demanda uma conversão em sua entrada e saída de informações para o sistema GKS.

Também deverão ser informados os tempos da simulação, sendo estes referentes ao tempo total da descarga e o passo de evolução do modelo.

Todos os dados de entrada do modelo são apresentados na tabela I, abaixo, e no extrato da listagem de saída do modelo, apresentada no Apêndice B.

Tabela I – Valores das variáveis de entrada do modelo.

SEÇÃO / VARIÁVEL	DESCRIÇÃO	VALOR
<b>GRID</b>	Seção de informações sobre o grid da simulação e as informações da batimetria	
NMAX	Número de células no eixo W-E (Z)	34
MMAX	Número de células no eixo N-S (X)	91
DX	Tamanho do lado das células (quadradas)	30,5 m (100 ft)
CDEPTH	Profundidade local assumida (constante)	50 m (164 ft)
<b>OUTPUT</b>	Especifica as formas de informações desejadas, como localização da pluma, no plano horizontal e em perfis, as posições dos perfis e os tempos de simulação e do intervalo de cálculo da simulação (time step)	
PRINC	Número de profundidades por perfil	25
NPCUR	Número de perfis a serem analisados na malha	58
TIME	Tempo de geração das saídas	3.600 s (1 hr)
<b>DISCHARGE</b>	Descreve os aspectos da descarga	
BBLPH	Fluxo do volume descartado	Cenário 1 – 4.105,55 m <sup>3</sup> /dia (1.076,26 bbls/h) Cenário 2 – 13.435,09 m <sup>3</sup> /dia (3.521,11 bbls/h) Cenário 3 – 21.146,54 m <sup>3</sup> /dia (5.542,16 bbls/h)
RADIUS	Raio da tubulação do descarte	0,42 ft (10" 0,25 cm) (*1)
DJET	Profundidade	0,15 cm (0,5 ft)
ANGLE	Ângulo vertical de descarga (em graus referentes à horizontal – positivo para baixo e negativo para cima)	90°
BEAR	Azimute de descarte, graus do norte	90°
XRIG	Coordenada X do FPSO	625
ZRIG	Coordenada Z do FPSO	2300
TJET	Duração da descarga	Cenário 1 – 10.800 s (3 hs) Cenários 2 e 3 – 21.600 s (6 hs) (*3)
FTEMP	Temperatura da água produzida em °C	40°
FSAL	Salinidade da água produzida em ppm	56
PARAM	Descrição da partícula a modelar	óleo
ROSM	Densidade da partícula (g/cm <sup>3</sup> )	0,875
CS	Fração volumétrica da concentração da partícula	2.0 x 10 <sup>-5</sup>
VFALL	Velocidade de queda (negativa significa flutuabilidade)	-1,66 x 10 <sup>-5</sup> ft/s (-0,51 x 10 <sup>-5</sup> m/s)

AMBIENT	Descrição dos parâmetros do ambiente de descarte	
IFORM	Indicação de como serão entrados os valores de perfil de correntes	3 (lidos diretamente do arquivo)
NVP	Indicador se o mesmo perfil será usado em todos os intervalos de integração	1 (sim)
NFORM	Indicador do número de pontos a serem lidos e o formato dos dados	-2 (dois pares de intensidade e direção das correntes)
DUWA	Profundidades das observações de correntes	0 m (0 ft) e 50 m (164 ft)
PARM1	Intensidade da corrente em ft/s	0.45 m/s (1,47 ft/s)
PARM2	Direção das correntes, em graus	180° (para Sul)
NPROF	Indica o número de perfis de densidade a serem lidos	1 (perfil constante)
NROA	Número de pontos em cada perfil de densidade	2
YROA	Profundidade para o par T/S especificado	0 m (0 ft) e 50 m (164 ft)
TEMPA	Temperatura na profundidade	24,90 °C e 23,74 °C
SALA	Salinidade na profundidade	36,72 e 36,73
NSEA	Números de estados de mar	1
H3	Altura de onda significativa	2 m (6,5 ft)
T3	Período de onda significativa	6 s
WIND	Velocidade do vento (ft/sec)	6,7 m/s (22,21 ft/s)
AIRT	Temperatura do ar à superfície do mar	24,0 °C
<b>TIMESTEP</b>	Tempo de integração do passo da modelagem	
TIME	Tempo do passo de integração da modelagem	3.600 s (1 hr)
<b>WAKE</b>	Descreve efeitos de arrasto pela forma do FPSO de lançamento	
PLEN	Extensão do FPSO	337 m (1.105 ft)
PWID	Largura do FPSO	54,5 m (178,8 ft)
PDEP	Calado do FPSO	21,6 m (71 ft)
STDIA	Diâmetro característico das estruturas submersas	168,25 m (552 ft)
STSPA	Espaçamento característico das estruturas submersas	0,03 m (0,1 ft)
RNOSC	Parâmetro que define o comprimento da zona de arrasto (valor para a frequência de oscilação do número de flutuabilidade – number of buoyancy)	0 (utiliza o default = 3)
RNDEP	Parâmetro que define a profundidade da zona de arrasto (valor para multiplicar o calado do FPSO)	0 (utiliza o default = 1,3)

(\*1) – Considerado o descarte conservativo, junto a superfície do mar.

(\*2) – Valores lançados em função de preservação da estabilidade do modelo.

### 3.3 SAÍDAS DO MODELO

As listagens apresentadas no Apêndice B são referentes à uma parte das saídas dos dados do modelo OOC para os cenários modelados para o efluente da água produzida característica da operação no campo de Albacora Leste.

Conforme apresentado nos dados de entrada, foram solicitadas as saídas de valores de concentração para 58 perfis localizados ao longo da direção da corrente até a distância de 1.750 metros do FPSO P-50, a fim de verificar a extensão máxima deste efeito. Também foram solicitadas as concentrações em 25 planos horizontais até 50 metros de profundidade, para verificação do espalhamento da água produzida em sua interação com o mar local em perfil.

O primeiro cenário levou em consideração o período com as primeiras quantidades significativas do efluente, no entanto, ainda inferiores à 10.000 m<sup>3</sup>/dia. Este período englobará os anos de 2007 a 2010 (4 anos). O valor modelado da vazão utilizada foi a média do período, ou seja, 4.105,55 m<sup>3</sup>/dia. O segundo cenário abordou o período de produção classificada como fase intermediária, englobando valores de 10.000 a 17.000 m<sup>3</sup>/dia, que ocorrerão de 2011 a 2015, com a média da vazão calculada em 13.435,09 m<sup>3</sup>/dia. O terceiro e último cenário, exprime a média de produção para a fase mais intensa de geração do efluente para valores em torno de 20.000 m<sup>3</sup>/dia, de 2016 a 2025. Neste período se localiza o máximo de produção durante o desenvolvimento do campo (22.315,10 m<sup>3</sup>/dia em 2021), apresentando média de 21.146,54 m<sup>3</sup>/dia.

Os resultados são apresentados na forma tabular dentro do próprio arquivo de saída, ou em arquivos próprios para cada caso. Para facilitar a visualização destes resultados foram elaboradas as Figuras 2, 3 e 4, apresentadas no Apêndice A.

### 3.4 PREMISSAS DA MODELAGEM REALIZADA

Com o intuito de reproduzir o mais fielmente os dados representativos da realidade operacional no desenvolvimento da simulação, foram assumidas certas premissas aplicadas na utilização destes dados pelo modelo.

#### a) Quanto ao GRID

O grid foi especificado de forma que o FPSO ficasse alinhado ao seu eixo Norte-Sul (que não corresponde ao geográfico), deslocado para seu lado esquerdo em função do efeito causado pela “barreira” representada pela sua estrutura no deslocamento da água de produção descartada. O alinhamento de todo o grid foi feito de forma que este eixo X (N-S) coincidisse com a direção da corrente, permitindo mais facilmente a determinação das coordenadas dos pontos onde o modelo apresenta os perfis de concentração na coluna d’água, e estendendo-se até 1.750 metros adjacentes à popa do navio. Os espaçamentos dos pontos do grid foram de 30,5 metros, em ambas as direções.

Esta disposição da embarcação, além de representar a realidade do descarte e da posição do FPSO em relação ao regime local de correntes, também representa o pior caso referente a redução do efeito da descarga pela sua extensão. Caso o navio estivesse perpendicular à corrente, os efeitos da sua passagem pela parte inferior do casco causariam uma turbulência no ponto de descarte, diminuindo a profundidade de efeito da descarga.



A profundidade máxima sensibilizada pela descarga da água produzida foi especificada em rodadas sucessivas do modelo, a partir de 100 metros de profundidade, definindo-se que a sua determinação em 50 metros seria ideal para a verificação do efeito.

O esquema representativo do grid é apresentado na Figura 1 no Apêndice A.

b) Quanto ao ponto da descarga do efluente da água produzida

O lançamento foi simulado como sendo feito do nível da água, sem a necessidade de correções nos valores da vazão. Este caso permite a formação do jato (fase convectiva), que modela de forma mais conservativa a interação do efluente no meio.

No caso real, o lançamento é feito de 7-10 metros de altura da linha d'água, o que causa a quebra deste jato no impacto com a superfície do mar, aumentando a turbulência no início da penetração e, conseqüentemente, a dispersão do efluente na coluna d'água.

c) Quanto à inclusão da concentração residual de óleo na água produzida

O modelo solicita a informação de certos parâmetros para caracterização do comportamento das gotículas de óleo misturadas à água produzida. O tamanho das gotículas foi estipulado em 200  $\mu\text{m}$ , o que é condizente com diâmetros além da eficiência dos equipamentos de separação água-óleo a serem instalados no FPSO P-50.

A sua fração volumétrica, relação do volume de óleo ao volume de efluente, foi calculada a partir da concentração residual limite permitida pela legislação e que será adotada na atividade, de 20 ppm, ajustadas para as vazões médias dos cenários modelados.

d) Quanto à determinação dos parâmetros ambientais

Os valores utilizados nas simulações são representativos de condições médias sazonais características para a região do campo, apresentados no estudo ambiental.

e) Quanto às considerações sobre o arrasto

Foram necessárias adequações aos parâmetros de cálculo do arrasto causado pela geometria do FPSO, a serem utilizados pela simulação. Primeiramente, as dimensões da embarcação são bem maiores que as normalmente modeladas, o que levou à estratégia de sua representação no grid. O seu natural alinhamento no sentido de deslocamento da corrente simula uma condição de borda no



lançamento da descarga, evitando uma maior dispersão horizontal nos primeiros metros. Entretanto a relação de maior penetração em profundidade na coluna d'água do que o calado operacional apresentado, permite que este bloqueio seja vencido pela interação ocorrida nas regiões mais profundas.

Outra adequação foi quanto às simulações do diâmetro característico das estruturas submersas e seu espaçamento. Para tal, o primeiro foi especificado como a metade da extensão do FPSO, ficando o segundo com um espaçamento mínimo, gerando um efeito semelhante ao real, causado pela integridade do casco.

f) Quanto a descargas simuladas de longa duração

O modelo utilizado simula a dispersão através do acompanhamento dos aglomerados individuais de cada componente. Existe um número limitante de aglomerados que ele pode utilizar em uma simulação (25.000). Por este motivo, o número de aglomerados que podem ser utilizados para representação da pluma por unidade de tempo, diminui a medida que a descarga aumenta (novas quantidade e novos aglomerados).

Isto quer dizer que descargas muito longas podem criar distribuições esparsas destes aglomerados na coluna d'água, o que pode gerar uma variabilidade significativa nas concentrações com o aumento da distância a partir do ponto de entrada da descarga no sistema.

A diluição e o espalhamento ao longo da distância do ponto de descarte são os principais produtos de interesse da simulação da água produzida. Nestes casos, a duração da descarga deverá ser definida o tempo suficiente para que a concentração no ponto mais distante de interesse chegue ao estado quasi-estacionário (EPRC, 1999).

Calculados os tempos para que a simulação não atingisse este problema de estabilidade computacional, verificou-se que no caso da menor vazão foi necessário uma ajuste no tempo de descarga (sua redução de 6 para 3 horas). Para otimização de sua utilização, foi analisada a utilização de um tempo de modelagem de descarga de 6 horas para os outros dois cenários, não causando as inconsistências computacionais. Outras análises foram feitas e observou-se que poderia ser usado o tempo total de descarga de até quatro horas, com uma hora de passo de integração, que os resultados seriam os mesmos para estes dois últimos cenários.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 DESCRIÇÃO DAS FIGURAS GERADAS

As análises feitas nesta seção são referentes às Figuras 2 a 4, apresentadas no Apêndice A. Elas representam a dispersão em perfil da concentração do óleo residual na pluma para os três cenários (baixa produção, fase intermediária e alta produção, respectivamente). A orientação do grid ocorre ao longo da direção predominante da corrente no local ( $180^{\circ}$  -  $200^{\circ}$ ).

As concentrações de óleo residual na pluma são expressas em mg/L (ppm).

### 4.2 LEITURA GERAL DOS PRODUTOS DA SIMULAÇÃO

Na parte inferior das três Figuras (2, 3 e 4), são apresentadas as zonas das fases convectiva, de colapso dinâmico e de dispersão passiva. Fica clara a correlação proporcional da extensão da fase convectiva com a vazão do efluente, também sentida na profundidade que ela alcança.

Outro fato destacável é a ação da advecção da corrente, que nos três cenários atuou no intervalo de 1.750 m de afastamento do FPSO, favorecendo a completa diluição do efluente nesta região, exprimindo uma maior dependência do afastamento da fonte em relação à intensidade da vazão. Este fato pode ser explicado pela maior área de contato da pluma (profundidade que atinge e largura da sua dispersão), favorecendo a diluição mais intensa pelas suas bordas.

A Figura 2, representante do cenário de vazão de baixa produção do efluente, demonstra um efeito bem localizado, junto à fonte de descarte, atingindo uma profundidade máxima de 15 metros e com o colapso da pluma já a 275 metros de afastamento do FPSO P-50. A primeira evidência de um afloramento do efluente retornando à superfície ocorre a cerca de 450 metros de afastamento, porém em concentrações residuais da ordem de  $10^{-3}$  ppm, que é constante na coluna de 0 a 12 metros de profundidade, dos 300 aos 1.750 metros de distanciamento da fonte.

A Figura 3 demonstra o simulado no cenário de fase intermediária de produção do efluente, que atinge uma profundidade máxima de 25 metros. O núcleo do jato é mais definido até 60 metros de afastamento do FPSO, numa faixa de 5 a 15 metros de profundidade, mantendo a fase convectiva até 350 metros de afastamento. A faixa de colapso dinâmico estende-se a partir daí, até 750 metros de afastamento, onde a pluma passa a ser dispersa passivamente.

O primeiro afloramento da pluma ressurgida ocorre a 950 metros de afastamento do FPSO, com valores residuais na ordem de  $10^{-3}$  ppm. A pluma é caracterizada por concentrações da ordem de  $10^{-2}$  ppm, sendo advectada pela corrente em uma camada de estabilidade de 10 a 12 metros de profundidade, e até 1.370 metros de afastamento, onde a diluição já é completa.

A Figura 4 representa o cenário de alta produção do efluente, de 2016 a 2025. O núcleo do jato é preservado até 15 metros de profundidade e 60 metros de afastamento do FPSO, sendo sua influência sentida até 30 metros de profundidade. A pluma se desloca sem evidências de colapsos até 950 m de afastamento do FPSO em uma faixa de profundidade que vai de 10 a 15 metros. Este colapso começa a ser identificado a 1.150 m da fonte, sendo rapidamente diluída até 1.600 m. Não é identificado um afloramento da pluma ressurgida, ficando esta estabilizada em sua camada de advecção.

Os gráficos 1 a 6 mostram as concentrações residuais de óleo em seis camadas de profundidades (5, 10, 15, 20, 25 e 30 m) para os três cenários modelados. Podemos verificar que as maiores concentrações na camada mais superficial (5 m) são achadas no Cenário 1 (menor vazão), explicadas pela menor integridade do jato na entrada no mar e a imediata interação com a água local. Nas camadas intermediárias (10 e 15 m) são mais destacadas às concentrações dos Cenários 2 e 3, em função da maior penetração destes na coluna d'água. A partir de 20 m, apenas o Cenário 3 apresenta valores expressivos, sendo que de 25 a 30 m as concentrações são inferiores a  $10^{-3}$  ppm.

O Gráfico 7 permite a comparação dos efeitos da penetração da pluma nos vários planos de profundidade para o Cenário 3. As maiores concentrações são verificadas até 300 metros de afastamento do FPSO, nas profundidades de 10 e 15 metros. Junto à superfície (5 m) as concentrações são residuais até 300 metros de afastamento do FPSO, em função do primeiro impacto do jato com a coluna d'água. Depois dos 300 m é evidenciado o não aparecimento da pluma ressurgida, com valores de concentração praticamente zeradas.

Nas profundidades de 10 a 20 metros é verificado um rápido incremento das concentrações em função da derivação do jato do efluente e dos ajustes hidrodinâmicos para sua estabilização. Os picos de concentração de cada profundidade vão decrescendo à medida que esta profundidade aumenta, sendo registrados em afastamentos crescentes da fonte. No caso do pico de 25 metros, este é verificado no mesmo afastamento da fonte (180 m) que o da profundidade de 20 metros, porém registrando a metade da concentração deste segundo.

A estabilização da pluma na camada de 10 a 15 metros de profundidade é visualizada no comportamento idêntico das concentrações a partir de 400 metros de afastamento do FPSO, evidenciando o deslocamento da pluma pela corrente local, sofrendo o colapso dinâmico de forma uniforme nas duas camadas. A partir de 1.650 m de afastamento do FPSO, os valores das concentrações tornam-se desprezíveis.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHEVRON Overseas Petroleum, 1997. Health, Safety and Environmental Guidelines: Pollution Prevention. Project HSE Information, MODEC. 109 pp.

EPRC (Exxon Production Research Company), 1999. Offshore Operators Committee Mud and Produced Water Discharge Model – Report and User Guide. Brandsma, M.G. and Smith, J.P., December, New Orleans, Louisiana, USA. 320 pp.

GESAMP, 1993. Impact of Oil and Related Chemicals and Wastes on the Marine Environment. GESAMP Reports and Studies , 50. London. 180pp.

THOMAS, J.E.; Triggia, A. A.; Correia, C.A.; Verotti Filho, C.; Xavier, J.A.D.; Machado, J.C.V.; Paula, J.L.; De Rossi, N.C.M.; Pitombo, N.E.S.; Gouvea, P.C.V.M.; Carvalho, R.S. & Barragan, R.V., 2001. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Thomas, J.E. (eds.) Ed. Interciência. PETROBRAS / Rio de Janeiro.

APÊNDICE A – Figuras resultantes da simulação

APÊNDICE B – Parte do arquivo de resultado da simulação, fornecido pelo programa OOC-PC.