



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

OTIMIZAÇÃO DO EMISSÁRIO DO RIO VERMELHO, SALVADOR – BA, VIA MODELAGEM COMPUTACIONAL

Mario Grüne de Souza e Silva

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2011

OTIMIZAÇÃO DO EMISSÁRIO DO RIO VERMELHO, SALVADOR – BA, VIA
MODELAGEM COMPUTACIONAL

Mario Grüne de Souza e Silva

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Examinado por:

Prof. Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph. D.

Prof. Isaac Volshan Júnior, D.Sc.

Prof. Iene Christie Figueiredo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO de 2011

De Souza e Silva, Mario Grüne

Otimização do Emissário do Rio Vermelho, Salvador – BA, via Modelagem Computacional / Mario Grüne de Souza e Silva – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2011.

xiv, 70 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Projeto de Graduação – UFRJ / POLI / Curso de Engenharia Ambiental, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 67-69.

1. Baía de Todos os Santos; 2. Emissário Submarino; 3. Tubulação Difusora; 4. Modelo Hidrodinâmico; 5. Modelo de Transporte Lagrangeano; 6. Campo Próximo; 7. Campo Afastado; 8. Carga Hidráulica

I. Rosman, Paulo Cesar Colonna. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental. III. Título.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

OTIMIZAÇÃO DO EMISSÁRIO DO RIO VERMELHO, SALVADOR – BA, VIA MODELAGEM COMPUTACIONAL

Mario Grüne de Souza e Silva

Fevereiro/2011

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Curso de Engenharia Ambiental

O Sistema de Disposição Oceânica do Rio Vermelho, localizado na vertente oceânica de Salvador, foi construído em meados da década de 1970. Atualmente, todo o esgoto coletado da cidade é lançado ao mar pelo emissário submarino deste sistema. Por se situar próximo ao Banco de Areia de Santo Antônio, e portanto em uma região com correntes hidrodinâmicas de altas magnitudes, a pluma efluente ao emissário atinge a zona de balneabilidade de Salvador com concentrações de poluente acima da permitida pela legislação ambiental vigente.

Em busca da avaliação deste problema e de uma proposta de solução, neste projeto foram analisados alguns cenários com prolongamentos distintos do emissário submarino. Para este estudo fez-se uso da modelagem computacional através do *software* SisBaHiA[®], desenvolvido pela COPPE/UFRJ.

Aproveitando o estudo, foi feita também a otimização da tubulação difusora em relação ao número e diâmetro de seus orifícios difusores e de sua angulação em relação às correntes hidrodinâmicas locais, de modo a permitir uma melhor diluição inicial dos efluentes nas águas marinhas.

A fim de manter os resultados dentro de limites práticos, verificou-se as cargas hidráulicas do sistema, além do custo necessário para o adequamento deste à solução proposta.

Os resultados obtidos pelos modelos de transporte Lagrangeano mostram que, para que a legislação ambiental seja plenamente atendida, é necessário que o emissário submarino

do Rio Vermelho seja prolongado em 2.000 metros, que sua tubulação difusora esteja posicionada com um ângulo azimutal de 202° e possua um total de 90 difusores.

Palavras-chave: Baía de Todos os Santos, Emissário Submarino, Tubulação Difusora, Modelo Hidrodinâmico, Modelo de Transporte Lagrangeano, Campo Próximo, Campo Afastado, Carga Hidráulica.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Environmental Engineer.

OPTIMIZATION OF THE OUTFALL OF RIO VERMELHO, SALVADOR – BA, VIA
COMPUTER MODELING

Mario Grüne de Souza e Silva

February/2011

Advisor: Paulo Cesar Colonna Rosman

Course: Environmental Engineering

The Oceanic Disposal System of Rio Vermelho, located on the sea slope of Salvador, was built in the mid-1970s. Currently, all the collected city sewage is thrown in the ocean by the submarine outfall of the system. Because it is situated next to the Santo Antônio's Sandbar, and therefore in a region with high magnitudes of tidal currents, the effluent's plume reaches the bathing area of Salvador with higher concentrations than permitted by the environmental regulations.

In pursuit of the evaluation of this problem and of a solution proposal, in this project some scenarios with different extensions of the submarine outfall were analyzed. For this study, computational modeling was used through the software SisBaHiA[®], which was developed by COPPE/UFRJ.

This project also includes the optimization of the diffuser pipe in the number and diameter of its orifices nozzles and its angle in relation to the local hydrodynamic currents, to allow a better initial dilution of the effluent in marine waters.

In order to keep the results under realistic boundaries, both the hydraulic head of the system and the cost required to adapt it to the solution proposal were recalculated.

The results obtained by using the Lagrangean transport models show that, to fully meet the environmental legislation, the submarine outfall of Rio Vermelho needs to be extended by 2,000 meters long, its diffuser pipe be positioned with an azimuth angle of 202° and have a total of 90 nozzles.

Keywords: Todos os Santos Bay, Submarine Outfall, Diffuser Pipe, Hydrodynamic Model, Lagrangean Transport Model, Near-Field, Far-Field, Hydraulic Head.

Agradecimentos

Aos meus pais Edmundo e Ursula e irmãos por me darem toda a estrutura e apoio familiar que me fizeram ser quem sou hoje. Agradeço principalmente aos meus pais por todo o enorme esforço despendido ao longo de todos esses anos para que seus filhos tivessem a melhor educação possível.

A todos os professores que fizeram parte da minha vida acadêmica, em especial Paulo Rosman pela sua orientação, não só neste projeto, mas também nos meus dois últimos anos da faculdade; Iene Figueiredo, Isaac Volschan, Jorge Henrique Prodanoff e Gilberto Fialho pela disponibilidade e paciência ao me receberem para tirar as inúmeras dúvidas; e Eloá por me ajudar a redescobrir a língua portuguesa.

Ao meus grandes amigos companheiros de curso pelas incontáveis risadas, momentos de diversão e estudo que me proporcionaram nesses cinco anos de faculdade. Não posso deixar de citar a minha namorada, Nayane, que desde o início se tornou mais do que uma grande amiga e esteve sempre ao meu lado.

Aos alunos da AECO (Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica) por estarem sempre dispostos a me ajudar a compreender o SisBaHiA[®] e descobrir esse novo mundo da modelagem hidrodinâmica e ambiental que se abriu para mim. Agradeço também à Marise, por estar sempre de prontidão para resolver os problemas de todos os alunos do laboratório, além de fornecer uma imensa alegria ao nosso ambiente de trabalho e estudo.

Índice

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Lista de Gráficos	xiii
Lista de Constantes	xiv
1. Introdução	1
1.1. Emissários Submarinos	1
1.2. O Sistema de Disposição Oceânica do Rio Vermelho	3
1.3. Justificativa.....	6
1.4. Objetivo.....	7
1.5. Metodologia	7
1.5.1. Dimensionamento	8
1.5.2. Posicionamento.....	9
1.5.3. A Modelagem Computacional	9
2. Legislação Ambiental	14
2.1. Resoluções CONAMA.....	14
2.2. Indicador de Contaminação Fecal	16
3. Otimização do Sistema de Disposição Oceânica do Rio Vermelho	17
3.1. Dimensionamento da Tubulação Difusora.....	17
3.1.1. Caracterização do Emissário do Rio Vermelho	17
3.1.2. Preparação para a Rotina de Rawn	19
3.1.3. Rotina de Rawn.....	22
3.1.4. Perfil hidráulico da tubulação difusora otimizada	27
3.1.5. Perfil hidráulico ao longo de todo o emissário	28
3.2. Posicionamento da tubulação difusora.....	33
3.2.1. Malha	34
3.2.2. Batimetria.....	35

3.2.3.	Dados de maré.....	35
3.2.4.	Dados de vento.....	37
3.2.5.	Vazão efluente do ESRV	38
3.2.6.	Modelagem Hidrodinâmica	39
3.2.7.	Modelagem Lagrangeana.....	52
4.	Solução proposta.....	64
5.	Conclusão	66
6.	Referências Bibliográficas.....	67
	Anexo 1 – Rotina de Rawn	70

Lista de Figuras

Figura 1 – Esquema da descarga do efluente. A estampa da esquerda representa a descarga realizada com difusor constituído por múltiplos difusores e a estampa da direita o caso da descarga realizada por orifício individual (fonte: Feitosa, 2007).	2
Figura 2 – Unidades componentes de um Sistema de Disposição Oceânica de Esgotos Sanitários (fonte: Gonçalves & Souza, 1997).	3
Figura 3 – Disposição das vertentes da região metropolitana de Salvador (Topázio, 2003).	4
Figura 4 – O Emissário Submarino do Rio Vermelho – ESRV e a Tubulação Difusora com uma inclinação de N257°.	5
Figura 5 – O atual Emissário Submarino do Rio Vermelho e a posição prevista para o futuro Emissário Submarino do Jaguaribe.....	6
Figura 6 – Fluxograma do processo de modelagem de um fenômeno com detalhamento da modelagem numérica (fonte: De Paula, 2009).	10
Figura 7 – Sistema de coordenadas de modelagem, onde NR é o nível de referência. No caso 2DH, U_i representa a velocidade promediada na vertical.....	12
Figura 8 – O Emissário Submarino do Rio Vermelho. A linha vermelha tracejada demarca a região de balneabilidade, distante 300 m em relação à costa.	18
Figura 9 – Perda de Carga em curvas com ângulo obtuso (fonte: Site <i>Soler & Palau – Soluções Inovadoras</i> . Acessado no dia 15/10/2010 às 10:53).	30

Figura 10 – Região do ESRV com localização dos pontos de amostragem para monitoramento (fonte: Rosman, 2010).	33
Figura 11 – Malha de elementos finitos utilizada.	34
Figura 12 – Batimetria como vista pelo modelo, com base nos dados da malha de discretização do domínio da BTS considerado.	35
Figura 13 – Velocidade e direção do vento convertida para altura padrão de 10 m acima do NMM, a partir de valores medidos em fevereiro de 2008 na estação de Amaralina (13° 00' 54.5" S / 38° 28' 47.7" W). Note que a seta do Norte não aponta para cima como é usual. ..	37
Figura 14 – Velocidade e direção do vento no inverno convertida para a altura padrão de 10 m acima do NMM, a partir de valores medidos em junho de 2008 na estação de Amaralina (13° 00' 54.5" S / 38° 28' 47.7" W). Novamente, note que a seta do Norte não aponta para cima como é usual.	38
Figura 15 – Campo de velocidades médio na coluna d'água para a BTS e cercanias e detalhe da região de interesse, no dia 21/02/2008 às 16:30h, durante a preamar de sizígia para o período de verão.	43
Figura 16 - Campo de velocidades médio na coluna d'água para a BTS e cercanias e detalhe da região de interesse, no dia 21/02/2008 às 19:30h, durante a meia maré vazante de sizígia para o período de verão.	44
Figura 17 - Campo de velocidades médio na coluna d'água para a BTS e cercanias e detalhe da região de interesse, no dia 21/02/2008 às 22:30h, durante a baixamar de sizígia para o período de verão.	45
Figura 18 - Campo de velocidades médio na coluna d'água para a BTS e cercanias e detalhe da região de interesse, no dia 22/02/2008 às 01:30h, durante a meia maré enchente de sizígia para o período de verão.	46
Figura 19 - Campo de velocidades médio na coluna d'água para a BTS e cercanias e detalhe da região de interesse, no dia 04/06/2008 às 03:40h, durante a preamar de sizígia para o período de inverno.	48
Figura 20 - Campo de velocidades médio na coluna d'água para a BTS e cercanias e detalhe da região de interesse, no dia 04/06/2008 às 06:40h, durante a meia maré vazante de sizígia para o período de inverno.	49
Figura 21 - Campo de velocidades médio na coluna d'água para a BTS e cercanias e detalhe da região de interesse, no dia 04/06/2008 às 09:40h, durante a baixamar de sizígia para o período de inverno.	50

Figura 22 - Campo de velocidades médio na coluna d'água para a BTS e cercanias e detalhe da região de interesse, no dia 04/06/2008 às 13:40h, durante a meia maré enchente de sizígia para o período de inverno.	51
Figura 23 – Batimetria com foco na região próxima ao ESRV.	52
Figura 24 – Mapa de isolinhas de probabilidade de permanência de colimetria no Cenário 1 (A_0) com valor acima de 1.000 NMP/100ml para o período de verão.....	61
Figura 25 – Pluma de concentração de coliformes termotolerantes para o Cenário 1 (A_0) no dia 22/02/2008 às 01:30h, durante a meia maré enchente de sizígia para o período de verão.....	61
Figura 26 – Mapa de isolinhas de probabilidade de permanência de colimetria no ESRV com valor acima de 2.500 NMP/100ml para o Cenário 1 (A_0) durante o verão.	62
Figura 27 – Mapa de isolinhas de probabilidade de permanência de colimetria no ESRV com valor acima de 2.500 NMP/100ml para o Cenário 3 (P_700) de verão.	63
Figura 28 – Mapa de isolinhas de probabilidade de permanência de colimetria no ESRV com valor acima de 2.500 NMP/100ml para o Cenário 6 (P_2000) de verão.	64

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Cenários analisados ao longo deste trabalho.....	8
Tabela 2 – Padrões de balneabilidade – Resolução CONAMA 274/2000.	15
Tabela 3 – Características principais do SDORV.....	18
Tabela 4 – Resumo dos resultados da Rotina de Rawn para a tubulação difusora com 90 difusores de 15 cm.	22
Tabela 5 – Modificações em cada grupo de orifícios difusores.....	24
Tabela 6 – Resumo dos resultados da Rotina de Rawn depois das modificações nos orifícios.	25
Tabela 7 – Resumo das perdas de carga ao longo do Emissário para o Cenário 2 (P_0).	31
Tabela 8 – Altura necessária das chaminés de equilíbrio para cada solução porposta.	33
Tabela 9 – Concentração de Coliformes Termotolerantes em cada período.	39
Tabela 10 – Resumo do estudo de otimização do ângulo da tubulação difusora.	55
Tabela 11 – Resumo dos resultados obtidos para a diluição mínima no campo próximo para o cenário de verão.	57
Tabela 12 – Características principais do novo SDORV.....	64
Tabela 13 – Custos relacionados a cada situação.	65

Lista de Gráficos

Gráfico 1 – Velocidade por orifício difusor. Note que no eixo das abscissas, 90 ou 72 corresponde ao orifício mais a montante e 1, ao mais a jusante.	26
Gráfico 2 – Vazão por Orifício Difusor. Note que no eixo das abscissas, 90 ou 72 corresponde ao orifício mais a montante e 1, ao mais a jusante.	26
Gráfico 3 – Linha de Carga Hidráulica na tubulação difusora otimizada.....	28
Gráfico 4 – Perfil hidráulico do emissário para o Cenário 2 (P_0).	32
Gráfico 5 – Níveis de maré registrados na Campanha de Verão de 2008 na região do ESRV. Os valores acima estão referidos ao nível médio do mar na região, durante o período de medição.	36
Gráfico 6 – Níveis de maré registrados na Campanha de Inverno de 2008 na região do ESRV. Os valores acima estão referidos ao nível do mar na região, durante o período de medição. .	36
Gráfico 7 – Vazões médias horárias medidas em 2008 e conservadoras consideradas como elfuentes do ESRV para o período de verão.	39
Gráfico 8 – Vazões médias horárias medidas em 2008 e conservadoras consideradas como efluentes do ESRV para o período de inverno.....	39
Gráfico 9 – Calibração da elevação da maré e das correntes L-O e N-S na superfície para o período de verão.....	40
Gráfico 10 – Calibração das correntes L-O e N-S a 5 metros de profundidade para o período de verão.	40
Gráfico 11 - Calibração da elevação da maré e das correntes L-O e N-S na superfície para o período de inverno.	41
Gráfico 12 - Calibração das correntes L-O e N-S a 5 metros de profundidade parra o período de inverno.....	41
Gráfico 13 – Plotagem dos instantes específicos analisados de sizígia e quadratura para o período de verão.....	42
Gráfico 14 - Plotagem dos instantes específicos analisados de sizígia e quadratura para o período de inverno.	47
Gráfico 15 – Estudo da angulação ideal da tubulação difusora para as correntes de superfície durante o período de verão. Note que as linhas que representam a tubulação difusora, tanto no caso atual (Cenário 1 (A_0)) como no ideal (Cenário 2 (P_0)), estão fora de escala e do seu posicionamento real.	54

Gráfico 16 - Estudo da angulação ideal da tubulação difusora para as correntes de superfície a 4.500 metros da costa - Cenário 7 (P_2500), durante o período de verão.	55
Gráfico 17 – Ângulo de ação das correntes em relação à tubulação difusora para os Cenários 1 (A_0) e 2 (P_0) durante o verão. 0° corresponde à ação paralela e 90° corresponde à ação perpendicular.....	56
Gráfico 18 – Variação temporal da diluição mínima no fim do campo próximo para a situação do emissário atual no cenário de verão. Ce/C é a razão entre a concentração no emissário (Ce) e a concentração máxima na pluma do emissário no final do campo próximo.	57
Gráfico 19 - Variação temporal do comprimento do campo próximo para o Cenário 2 (P_0) no período de verão. Garantia de uma diluição mínima mínima de 1:100 dentro de um raio de 500 m centrado no eixo da tubulação difusora.	58
Gráfico 20 – Profundidade do topo da pluma no período de verão para o emissário atual. O eixo x representa o tempo do modelo em horas, onde 0h corresponde ao dia 16/02/2008 às 10:30h.	59
Gráfico 21 – T ₉₀ médio ao longo da espessura da pluma em horas para o período de verão. O eixo das abscissas representa o tempo do modelo em horas, onde 0h corresponde ao dia 16/02/2008 às 10:30h.....	60

Lista de Constantes

- g – Aceleração gravitacional (9,81 m/s²)
- ρ_{ad} – Massa específica da água doce (1.000 kg/m³)
- d_{ad} – Densidade da água doce (1,000)
- γ_{ad} – Peso específico da água doce (9.810 N/m³)
- ρ_{as} – Massa específica da água salgada (1.025 kg/m³)
- d_{ad} – Densidade da água salgada (1,025)
- γ_{as} – Peso específico da água salgada (10.055,25 N/m³)
- ρ_e – Massa específica do efluente (999 kg/m³)
- d_e – Densidade do efluente (0,999)
- γ_e – Peso específico do efluente (9.800 N/m³)
- μ_e – Viscosidade Dinâmica do Efluente (0,00103 N.s/m²)

1. Introdução

Neste primeiro capítulo será apresentada uma alternativa de disposição de efluentes para as grandes cidades costeiras, chamada de Sistema de Disposição Oceânica. Existente em Salvador desde meados de 1970, o Sistema de Disposição Oceânica do Rio Vermelho será o foco deste projeto. A seguir, será dada uma detalhada descrição do seu histórico na cidade e de suas principais características, além da justificativa para a realização deste estudo, o objetivo a ser alcançado e a metodologia a ser utilizada.

1.1. Emissários Submarinos

Os Emissários Submarinos são uma forma de disposição final de efluentes urbanos ou industriais, que visa a aproveitar a energia de diluição e a capacidade de autodepuração do oceano. Têm sido amplamente utilizados em grandes cidades costeiras onde a opção por um Sistema de Tratamento de Esgotos torna-se, em alguns casos, muito cara.

A rigor, um emissário submarino é apenas uma das partes de um Sistema de Disposição Oceânica, que em geral é composto por cinco unidades:

- i) Estação de Condicionamento Prévio
É o local onde os efluentes a serem lançados às águas marinhas receberão um pré-tratamento para a redução da concentração de algumas de suas características, que possam danificar o sistema a jusante ou impedir o atendimento às legislações ambientais vigentes;
- ii) Emissário Terrestre
Destinado a transportar esses efluentes até a Chaminé de Equilíbrio;
- iii) Câmara ou Chaminé de Equilíbrio
Estrutura destinada a absorver as flutuações de pressão geradas pela oscilação das marés e das vazões de esgoto afluentes e, ao mesmo tempo, garantir a estabilidade do bombeamento do esgoto pré-condicionado em regime contínuo e uniforme;
- iv) Emissário Submarino
Tubulação apoiada ou enterrada no leito oceânico destinada a transportar os efluentes pré-condicionados até a tubulação difusora;

v) Tubulação Difusora

Parte final do emissário submarino que possui diversos difusores, compostos por um ou mais orifícios, por onde o efluente é efetivamente lançado ao mar (Figura 1).

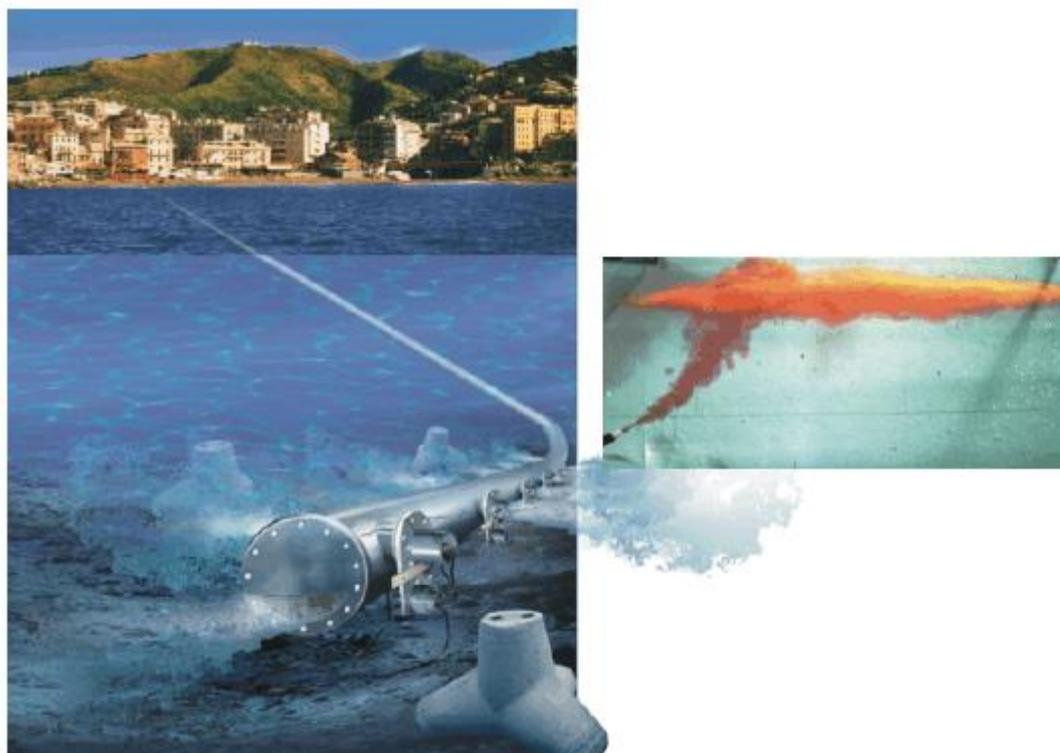


Figura 1 – Esquema da descarga do efluente. A estampa da esquerda representa a descarga realizada com difusor constituído por múltiplos difusores e a estampa da direita o caso da descarga realizada por orifício individual (fonte: Feitosa, 2007).

Gonçalves & Souza (1997) definem um sistema de disposição oceânica de esgotos sanitários, como aquele destinado a promover o tratamento dos efluentes, utilizando a capacidade potencial de auto-depuração das águas marinhas, para promoção da redução das concentrações poluentes a níveis admissíveis, antes que o campo de mistura dos efluentes com as águas marinhas do corpo receptor possa, nas condições mais adversas de deslocamento, atingir áreas de usos benéficos, especialmente aquelas relacionadas ao banho e esportes aquáticos ou à atividade de aqüicultura.

A Figura 2 mostra um esquema destas unidades de um sistema de disposição oceânica.

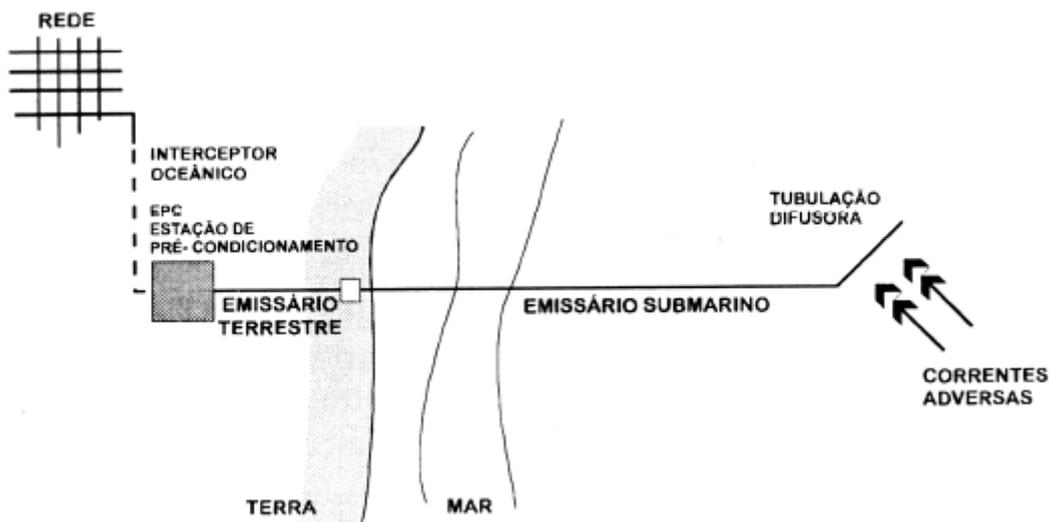


Figura 2 – Unidades componentes de um Sistema de Disposição Oceânica de Esgotos Sanitários (fonte: Gonçalves & Souza, 1997).

1.2. O Sistema de Disposição Oceânica do Rio Vermelho

O Sistema de Esgotamento Sanitário de Salvador foi planejado considerando duas grandes vertentes de drenagem: a vertente oceânica e a vertente baía, que drenam para o Oceano Atlântico e Baía de Todos os Santos respectivamente (Figura 3). Até o ano de 1995, apenas uma pequena parte do sistema de esgotamento de Salvador estava implantado, atendendo aproximadamente 20% dos 2,6 milhões de habitantes. O esgoto coletado na área atendida pela rede pública era então, encaminhado ao Sistema de Disposição Oceânica de esgotos do Rio Vermelho – SDORV (Topázio, 2003).



Figura 3 – Disposição das vertentes da região metropolitana de Salvador (Topázio, 2003).

O SDORV foi implantado em meados da década de 1970, e vinha operando, até meados de 2007, abaixo da sua capacidade instalada, que corresponde à vazão de $8,3 \text{ m}^3/\text{s}$. A rede implantada até a década de 1990 coletava pouco mais de $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$. O Governo do Estado da Bahia, considerando a capacidade ociosa instalada do SDORV, optou por fazer a reversão dos esgotos da vertente baía para a vertente oceânica buscando atingir a plena carga do emissário instalado. Atualmente toda a rede implantada drena seus esgotos para o SDORV (Topázio, 2003).

Após interceptar os esgotos da cidade, segundo o site da EMBASA (Acessado no dia 10/10/2010 às 12:50), o SDORV é composto por:

- i) Estação de Pré-condicionamento:
 - ✓ Gradeamento: para a retirada dos sólidos grosseiros. As barras são espaçadas em 25 mm;
 - ✓ Desarenadores: destinados à retirada de areia;
 - ✓ Peneiras rotativas: removem de 10 a 30% dos sólidos suspensos nos esgotos após as etapas anteriores, através de 10 peneiras rotativas com abertura de malha de 2 mm;
 - ✓ Controle de odores: para neutralizar os odores gerados pelas unidades da estação;

- ii) Emissário terrestre: com uma extensão de 1.019 m de concreto e diâmetro de 1,75 m;
- iii) Estação elevatória de alto recalque: são utilizadas sete bombas para a elevação dos esgotos. Não há informação da altura a qual os esgotos são elevados;
- iv) Chaminé de equilíbrio: unidade auxiliar ao processo de bombeamento;
- v) Emissário Submarino: com uma extensão de 2.000 m – excluindo-se a tubulação difusora, e diâmetro de 1,75 m. O material da tubulação é de concreto;
- vi) Tubulação Difusora: com um comprimento de 350 m, diâmetro de 1,75 m, contendo 70 orifícios difusores laterais, dispostos de modo alternado a intervalos de 5m, ao longo da geratriz lateral, e 2 frontais. Todos os difusores possuem um diâmetro de 15 cm e estão submersos a uma profundidade de 27 m. Como pode ser observado na Figura 4, esta tubulação encontra-se inclinada de N257^{o1}.

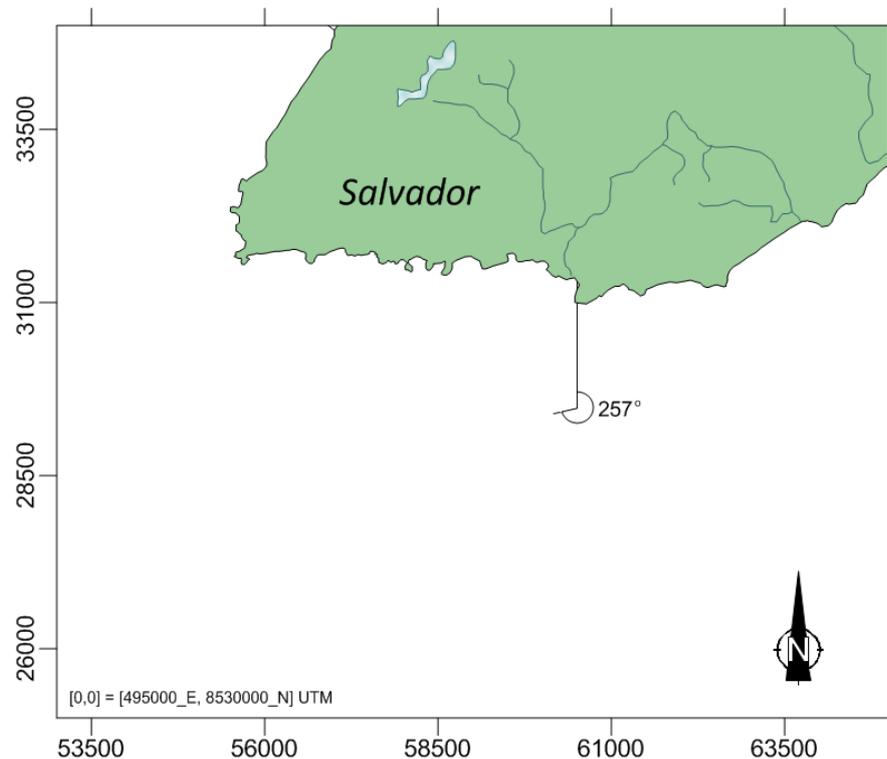


Figura 4 – O Emissário Submarino do Rio Vermelho – ESRV e a Tubulação Difusora com uma inclinação de N257^o.

Visto que em 2007 o SDORV estaria saturado, o Plano Diretor de Esgoto de Salvador viu a necessidade da construção de um segundo sistema de disposição oceânica – do Jaguaribe (SDOJ), para atender ao crescimento populacional da cidade. Este terá uma vazão máxima de

¹ Ângulo Azimutal relativo ao Norte geográfico, sendo que 0° corresponde à direção Norte e o ângulo crescente no sentido horário.

projeto de 5,9 m³/s, um emissário submarino de 3.648m e se localizará mais ao norte de Salvador, como mostra a Figura 5.

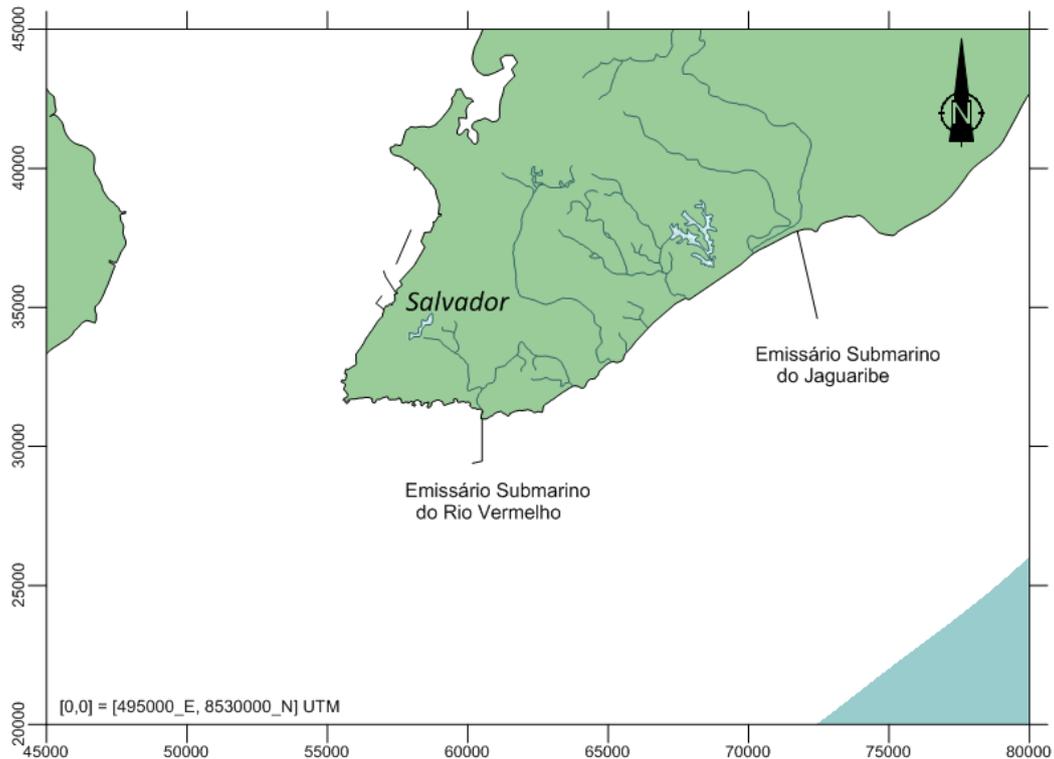


Figura 5 – O atual Emissário Submarino do Rio Vermelho e a posição prevista para o futuro Emissário Submarino do Jaguaribe.

1.3. Justificativa

A importância da tubulação difusora para uma boa eficiência do sistema de disposição oceânica é enorme. Portanto, esta deve ser cuidadosamente estudada. O seu dimensionamento deve ser ótimo para que permita a melhor diluição dos esgotos nas águas marinhas, assim como evite uma sobrecarga dos componentes a montante do sistema. Ao mesmo tempo, o seu posicionamento, tanto horizontal – distância à costa e angulação em relação às correntes marinhas, quanto vertical – profundidade do leito oceânico, devem “proporcionar a formação de um adequado campo de mistura efluentes pré-condicionados/águas marinhas, capaz de reduzir as concentrações poluidoras de forma que, sob as condições de deslocamento mais adversas que possam ocorrer em uma determinada área, esse campo de mistura venha, nesse caso, a atingir as áreas de usos benéficos com as concentrações de poluentes dentro dos padrões admissíveis pela legislação ambiental vigente.” (Gonçalves & Souza, 1997)

O posicionamento da tubulação difusora do SDORV não é o mais adequado do ponto de vista ambiental, pois a sua pluma de efluente atinge a costa da cidade de Salvador com

concentrações acima das estabelecidas pela Resolução CONAMA 274/2000, que estabelece padrões de balneabilidade.

Este fato se deve à localização do emissário submarino estar muito próxima ao Banco de Santo Antônio, um banco de areia existente na embocadura da Baía de Todos os Santos. As correntes hidrodinâmicas nessa região são fortemente influenciadas por este local de baixas profundidades, facilitando a aproximação da pluma de efluente à costa.

Aproveitando o estudo, o dimensionamento hidráulico da tubulação difusora também será revisto, buscando a maior eficiência desta na diluição inicial do esgoto nas águas marinhas.

1.4. Objetivo

O objetivo deste trabalho é fazer uma reanálise dos aspectos do projeto dos três últimos componentes do SDORV – chaminé de equilíbrio, emissário submarino e tubulação difusora, buscando saber qual teria sido o posicionamento e dimensionamento ideais da tubulação difusora do emissário à luz das ferramentas computacionais, hoje disponíveis.

A solução a ser escolhida levará em consideração o perfil hidráulico do sistema. Também será feita uma estimativa dos custos econômicos, de forma a manter os resultados dentro de limites práticos.

Não serão discutidos soluções que contemplem o deslocamento do emissário submarino na direção paralela à costa, dado que tal alternativa seria inviável economicamente. Também não será analisado a influência futura do Emissário Submarino do Jaguaribe sobre a pluma efluente do Emissário do Rio Vermelho, dado que este trabalho possui o foco único e exclusivo sobre o SDORV. Também não será analisado como solução o aumento do nível de tratamento na estação de pré-condicionamento dos esgotos afluentes ao ESRV.

1.5. Metodologia

Primeiramente a tubulação difusora será otimizada em relação ao seu comprimento, quantidade e diâmetro dos orifícios, além do diâmetro da própria tubulação. A solução proposta deve ser aquela que permita a maior diluição do efluente no meio marinho e simultaneamente promova a menor perda de carga possível, evitando assim, problemas hidráulicos a montante e maiores gastos de energia.

Uma vez dimensionada corretamente, o posicionamento da tubulação difusora, ou seja, a sua angulação em relação às correntes marinhas e distância à costa, será avaliado. O

comprimento do emissário submarino será aumentado gradualmente de 700, 1.000, 1.500, 2.000 e 2.500 m. A solução proposta deve ser aquela que faça com que a legislação ambiental vigente para o critério de balneabilidade das praias (Resolução CONAMA 274/2000) seja atendida.

A Tabela 1 indica os sete cenários a serem analisados ao longo deste trabalho, junto com as suas características.

Tabela 1 – Cenários analisados ao longo deste trabalho.

Cenários Analisados	Características
1 (A_0)	Tubulação difusora e emissário submarino com as características atuais, ou seja, este cenário corresponde à situação presente do SDORV
2 (P_0)	Tubulação difusora otimizada em relação à quantidade de difusores e seus diâmetros, comprimento e angulação. Emissário submarino com o mesmo comprimento atual, ou seja, 2.000 metros
3 (P_700)	Tubulação difusora otimizada em relação à quantidade de difusores e seus diâmetros, comprimento e angulação. Emissário submarino com um extensão adicional de 700 metros
4 (P_1000)	Tubulação difusora otimizada em relação à quantidade de difusores e seus diâmetros, comprimento e angulação. Emissário submarino com um extensão adicional de 1.000 metros
5 (P_1500)	Tubulação difusora otimizada em relação à quantidade de difusores e seus diâmetros, comprimento e angulação. Emissário submarino com um extensão adicional de 1.500 metros
6 (P_2000)	Tubulação difusora otimizada em relação à quantidade de difusores e seus diâmetros, comprimento e angulação. Emissário submarino com um extensão adicional de 2.000 metros
7 (P_2500)	Tubulação difusora otimizada em relação à quantidade de difusores e seus diâmetros, comprimento e angulação. Emissário submarino com um extensão adicional de 2.500 metros

*Na listagem dos Cenários, entre parênteses, “A” corresponde à tubulação difusora não otimizada, ou seja, Atual, “P” à tubulação difusora otimizada, ou seja, Proposta e os números 0, 700, 1.000 etc. à extensão adicional do emissário submarino de cada cenário.

Para cada um destes cenários, os seguintes métodos e programas de cálculo foram utilizados:

1.5.1. Dimensionamento

Para a otimização do dimensionamento da tubulação difusora do ESRV será utilizada a rotina de Rawn, descrita em Gonçalves & Souza (1997) e apresentada nos Capítulos 3.1.2, 3.1.3 e no Anexo 1 deste trabalho.

Esta rotina tem como objetivo criar um programa computacional que permita calcular o comprimento e o número de orifícios difusores ótimos a partir de vazões e diâmetros, tanto da tubulação principal quanto dos orifícios, conhecidos. O programa permite a mudança destes diâmetros de forma a adequá-los de acordo com as perdas de carga da tubulação difusora e as conseqüências para com a vazão efluente à mesma.

1.5.2. Posicionamento

Para a otimização do posicionamento da tubulação difusora será utilizado o SisBaHiA[®] - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental – COPPE/UFRJ. Como pode ser visto no site www.sisbahia.coppe.ufrj.br, o SisBaHiA[®] encontra-se continuamente em ampliação e aperfeiçoamento na COPPE/UFRJ desde 1987, através de várias teses de mestrado e doutorado, além de projetos de pesquisa. O sistema tem sido adotado em dezenas de estudos e projetos contratados à Fundação Coppetec envolvendo modelagem de corpos d'água naturais.

A seguir, se dá uma breve descrição do que é uma modelagem computacional e quais são os modelos e as equações que os governam utilizados no SisBaHiA[®].

1.5.3. A Modelagem Computacional

O trabalho de modelagem de um fenômeno consiste no processo de interpolação e extrapolação de informações coletadas de algum fenômeno de interesse, a partir da interpretação conceitual dos dados medidos e observados (modelo conceitual) e do posterior equacionamento deste modelo conceitual, denominado modelo matemático. (De Paula, 2009)

Para a resolução do modelo matemático existem quatro métodos distintos: através de modelos analíticos, analógicos, físicos ou numéricos. O modelo matemático em grande parcela das vezes deve ser resolvido de maneira não analítica, uma vez que as soluções analíticas consideram situações simplificadas e idealizadas, o que não se aplica à observação de fenômenos naturais. Por sua vez, o modelo analógico é aplicável em situações muito peculiares e de caráter mais teórico do que prático. A modelagem física, de caráter essencialmente empírico, é bastante trabalhosa e demorada, pois se baseia na semelhança física de fenômenos e exige a reprodução dos fenômenos através de protótipos. Por fim, a modelagem numérica consiste em resolver o modelo matemático de forma adaptada, através de outros métodos de cálculo, transformando, por exemplo, variáveis analíticas contínuas em variáveis numéricas, de mais fácil operação. O inconveniente da modelagem numérica é a geração de uma quantidade muito grande de contas e informações, que só foi possível de ser contornado com o advento da computação, tornando viável a solução numérica dos diversos modelos matemáticos, de forma mais rápida e confiável que os outros modelos. (Rosman, 2008)

Porém, para que essa confiabilidade seja atingida, é de suma importância que a coleta de dados seja feita de forma precisa, de modo a não induzir o modelo a resultados irreais. A

calibração dos modelos computacionais também é um etapa muito valiosa, pois é justamente o processo que equilibrará o modelo, aproximando-o ainda mais das medições feitas em campo. É necessário ressaltar a inevitabilidade de que o resultado de um modelo é no máximo tão bom quanto os dados que o alimentam.

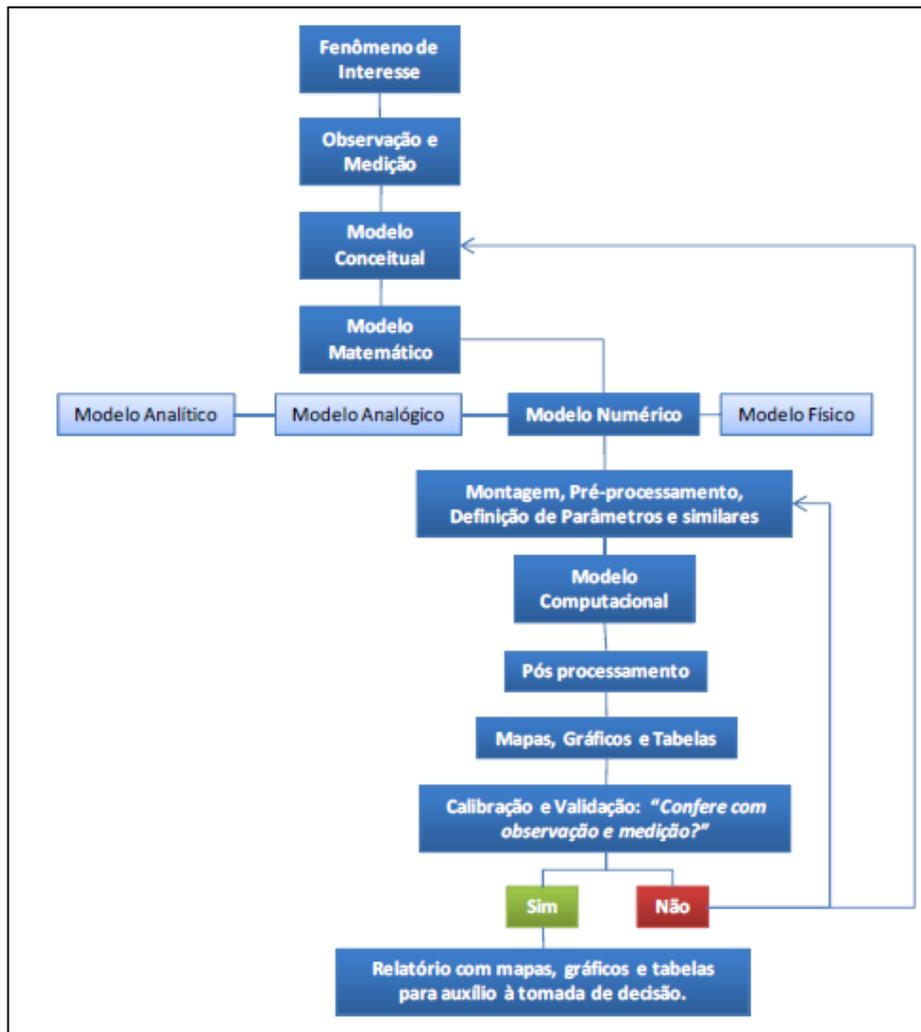


Figura 6 – Fluxograma do processo de modelagem de um fenômeno com detalhamento da modelagem numérica (fonte: De Paula, 2009).

1.5.3.1. O SisBaHiA[®]

O SisBaHiA[®] é um sistema de modelos computacionais que contém:

- I. Modelo Hidrodinâmico;
- II. Modelo de Transporte Euleriano;
- III. Modelos de Qualidade de Água e Eutrofização;
- IV. Modelos de Transporte de Sedimentos e Evolução Morfológica do Fundo;
- V. Modelo de Transporte Lagrangeano – Determinístico;

- VI. Modelo de Transporte Lagrangeano – Probabilístico;
- VII. Modelo de Campo Próximo para Emissários e Fontes Pontuais;
- VIII. Modelo de Geração de Ondas;
- IX. Modelo de Propagação de Ondas.

Para este trabalho serão utilizados os modelos hidrodinâmicos (I), lagrangeanos (V, VI) e de campo próximo (VII).

A. Modelagem Hidrodinâmica

A modelagem hidrodinâmica pode ser entendida como a determinação da quantidade de movimento de uma dada massa d'água, resultando na definição dos padrões de correntes. A modelagem matemática de um sistema hidrodinâmico, consiste no conjunto de equações capazes de representar os escoamentos naturais presentes nos corpos d'água. (Topázio, 2003)

O modelo hidrodinâmico adotado pelo SisBaHiA[®] é uma versão 3D da linhagem FIST (Filtered in Space and Time). Trata-se de um modelo numérico hidrodinâmico, tridimensional, otimizado para corpos d'água naturais (Kaufmann, 2009). Este modelo numérico é composto pelo princípio da conservação da quantidade de movimento que, em conjunto com a equação da continuidade, uma equação de estado e uma equação de transporte para cada constituinte da equação de estado, compõem o modelo matemático fundamental para qualquer corpo de água (De Paula, 2009).

O FIST3D utiliza uma eficiente técnica numérica em dois módulos:

- ✓ Um módulo promediado na vertical ou bidimensional na horizontal (2DH), através do qual a elevação da superfície livre e velocidades de corrente 2DH promediadas na vertical são calculadas. O cálculo do módulo 2DH é necessário ao 3D e por isso o modelo FIST3D sempre o calcula (Rosman, 2008).
- ✓ Um módulo 3D que calcula o campo de velocidades a partir do modelo 2DH.

Por se tratar de um emissário submarino com uma tubulação difusora apoiada no leito oceânico, neste trabalho optou-se por utilizar o módulo 3D.

O sistema de coordenadas usado pelo SisBaHiA[®] nos modelos hidrodinâmicos 2DH e 3D são apresentados na Figura 7.

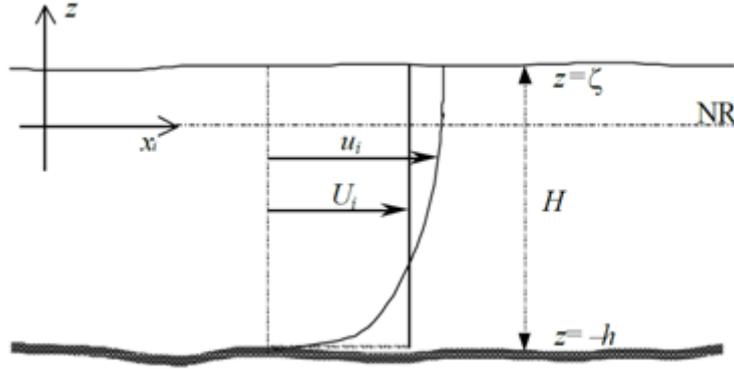


Figura 7 – Sistema de coordenadas de modelagem, onde NR é o nível de referência. No caso 2DH, U_i representa a velocidade promediada na vertical.

Na figura, u_i é a componente da velocidade na direção i (x e y) e ζ é a elevação da superfície livre. Tem-se assim, quatro incógnitas a serem calculadas pelo programa. Para tal, é necessário dispor de quatro equações resolvíveis que as envolvam. As equações utilizadas pelo programa encontram-se abaixo (Sampaio, 2003):

- ✓ Equação de quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2\Phi \sin \theta v \quad (1)$$

Onde:

u , v e w = componentes da velocidade do escoamento nas direções x , y e z , respectivamente;

ζ = elevação da superfície livre;

g = aceleração da gravidade;

ρ = densidade do fluido no local;

ρ_0 = densidade constante de referência;

Φ = velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local

θ = ângulo de latitude

- ✓ Equação de quantidade de movimento, com aproximação hidrostática, na direção y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2\Phi \sin \theta u \quad (2)$$

- ✓ Equação da continuidade (do volume):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

- ✓ Equação da continuidade (do volume) integrada ao longo da vertical

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz = 0 \quad (4)$$

Para que seja possível a resolução de tais equações, condições de contorno e iniciais devem ser fornecidas pelo modelador.

As condições de contorno consideradas podem ser verticais ou horizontais. As horizontais podem ser de dois tipos: de terra ou abertos. Os contornos de terra caracterizam as margens do corpo d'água no domínio, incluindo afluentes e captações. A fronteira aberta representa o limite do domínio de modelagem, não sendo uma limitação física, mas sim do modelo. Suas condições são caracterizadas pela elevação da superfície livre. Já as condições de contorno verticais são a velocidade nula no fundo e a tensão de atrito do vento na superfície, calculada a partir das velocidades de vento inseridas. (Machado & Da Silva, 2010)

No caso das condições iniciais, para que o programa calcule a variação dos parâmetros analisados, é preciso fornecer primeiramente estas condições para que sejam realizadas as interpolações e extrapolações pertinentes. Assim, o modelador deve informar, para o instante inicial de simulação, os valores de elevação da superfície livre ζ e as componentes da velocidade 2DH, u e v , para todos os nós do domínio modelado. (Sampaio, 2003)

B. Modelagem de Transporte Lagrangeano

Modelos de transporte lagrangeano se baseiam na observação da trajetória de uma partícula, em oposição à observação do movimento como um todo. Esse tipo de modelo é muito adequado para a representação de fontes de pequena escala em relação ao domínio do modelo hidrodinâmico (Rosman, 2008).

O modelo lagrangeano do SisBaHiA[®] é constituído por:

- ✓ Modelo Lagrangeano Determinístico: é um modelo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, para camadas de escoamento 3D ou 2DH. Este modelo é especialmente adequado para simulações de vários tipos de problemas, como por exemplo plumas de emissários ou pontos de lançamento de efluentes ao longo da costa. Permite a simulação de plumas de esgoto com vazões variáveis e taxas de decaimento (T_{90}) variáveis de acordo com época do ano, horas do dia, condições de cobertura de nuvens etc. (Rosman, 2008)

- ✓ Modelo Lagrangeano Probabilístico: é acoplado ao modelo anterior. Permite obtenção de resultados probabilísticos computados a partir de N eventos ou de resultados ao longo de um período T. (Rosman, 2008)
- ✓ Modelo de Campo Próximo para Emissários e Fontes Pontuais: este módulo está inserido no bloco de Modelo de Transporte Lagrangeano e funciona dinamicamente acoplado a um modelo hidrodinâmico. O modelo considera as características geométricas de linhas difusoras, perfis verticais variáveis de densidade no meio receptor, turbidez variável da água para cômputo da incidência de radiação solar. A radiação solar é computada em função da latitude e longitude, variando a partir da data e hora de início da simulação, com variação de nuvem etc. No caso de análises de balneabilidade, aceita diferentes tipos de indicadores de contaminação fecal, tais como coliformes termotolerantes, *escherichia colli* e *enterococcus*, além de curvas de decaimento prescritas pelo usuário. (Rosman, 2008)

Detalhes sobre as equações governantes e as condições iniciais e de contorno necessárias para o funcionamento do modelo podem ser adquiridos em Rosman (2008).

2. Legislação Ambiental

Este capítulo abrangerá a legislação ambiental vigente para a balneabilidade das praias, a qual pode ser utilizada como critério de análise de projetos de sistemas de disposição oceânica. Em se tratando de qualidade de água, é fundamental atrelar o estudo aos indicadores de poluição das águas. Por isso, mais adiante será justificado o uso do grupo Coliformes Termotolerantes como indicador de contaminação fecal, neste trabalho.

2.1. Resoluções CONAMA

Até muito recentemente, não existia no Brasil uma legislação ambiental específica para emissários submarinos. Isto, porque atualmente a Resolução CONAMA 357/2005 – que classifica as águas superficiais do Território Nacional, está sendo revisada de forma a incorporar restrições específicas para o lançamento de efluentes no oceano. No entanto, até o presente momento, o Capítulo IV – Das Condições e Padrões de Lançamento de Efluentes, ainda não apresenta com clareza os critérios que devem ser atendidos por um sistema de disposição oceânica. Portanto, este trabalho não contemplará as modificações feitas até então.

De qualquer forma, as Resoluções CONAMA 357/2005 e, principalmente, a 274/2000 – que estabelece padrões de balneabilidade, fornecem indicadores que devem ser observados no projeto de um sistema de disposição de efluentes no oceano.

O artigo 5º da Seção II da Resolução CONAMA 357/2005 estabelece que as águas salinas destinadas à recreação de contato primário² são classificadas como Classe I. Na continuação da mesma, o artigo 18º estabelece que os padrões de qualidade de água relativos aos coliformes termotolerantes, indicador de poluição que será utilizado neste trabalho, devem obedecer à Resolução CONAMA 274/2000.

Desta última, a seguinte tabela de padrões de balneabilidade das águas destinadas à recreação de contato primário pode ser construída.

Tabela 2 – Padrões de balneabilidade – Resolução CONAMA 274/2000.

Categoria		Coliformes Termotolerantes (NMP³/100mL)
Própria	Excelente	< 250 em 80% do tempo
	Muito Boa	< 500 em 80% do tempo
	Satisfatória	< 1.000 em 80% do tempo
Imprópria		> 1.000 em mais de 20% do tempo
		> 2.500 em qualquer instante

É importante ressaltar que a área de balneabilidade das praias costeiras, na cidade de Salvador, compreende toda a região até 300 m da linha da costa. Esta pode ser visualizada na Figura 8.

A partir de 2008, todo o litoral do Estado da Bahia passou a ser monitorado em relação à qualidade de suas águas. Constantemente, algumas delas não atendem aos critérios da Resolução CONAMA 274/2000, como é o caso da praia da Boca do Rio. Segundo o site do IMA (Instituto do Meio Ambiente), órgão vinculado à SEMA (Secretaria Estadual do Meio Ambiente – Bahia), durante o período chuvoso é desaconselhável o banho de mar próximo à desembocadura dos rios urbanos, córregos e canais de drenagem, por causa do aumento da concentração de bactérias nas águas, trazidas pelos mesmos. Desta forma, não é possível avaliar separadamente a influência da pluma efluente ao emissário do Rio Vermelho por análises de campo, tornando a modelagem computacional a forma mais viável e precisa.

² Recreação de contato primário é quando existir o contato direto do usuário com os corpos de água como, por exemplo, as atividades de natação, esqui aquático e mergulho.

³ NMP = Número Mais Provável.

2.2. Indicador de Contaminação Fecal

Sperling (2005), apresenta uma detalhada descrição das doenças de veiculação hídrica, suas causas e consequências, além de uma explicação do que são indicadores de contaminação fecal e as razões pela escolha de cada grupo de organismos para este fim. Os trechos a seguir foram extraídos desta referência.

Os microorganismos desempenham diversas funções de fundamental importância, principalmente as relacionadas com a transformação da matéria dentro dos ciclos biogeoquímicos. No tratamento biológico dos esgotos, os microorganismos são os responsáveis pelas reações de conversão da matéria orgânica e inorgânica.

Um outro aspecto de grande relevância em termos da qualidade biológica da água é o relativo à possibilidade da transmissão de doenças. A determinação da potencialidade de uma água transmitir doenças pode ser efetuada de forma indireta, através dos organismos indicadores de contaminação fecal, pertencentes principalmente ao grupo de coliformes.

A detecção dos agentes patogênicos em uma amostra d'água é extremamente difícil, em razão das suas baixas concentrações, o que demandaria o exame de grandes volumes da amostra para que fossem detectados os poucos seres patogênicos. As razões de tal devem-se aos seguintes fatos:

- ✓ Em uma população apenas uma determinada faixa apresenta doenças de veiculação hídrica;
- ✓ Nas fezes destes habitantes a presença de patógenos pode não ocorrer em elevada proporção;
- ✓ Após o lançamento no corpo receptor ou no sistema de esgotos há ainda uma grande diluição do despejo contaminado.

Este obstáculo é superado através do estudo dos chamados organismos indicadores de contaminação fecal. Tais organismos são predominantemente não patogênicos, mas dão uma satisfatória indicação de quando uma água apresenta contaminação por fezes humanas ou de animais e, por conseguinte, da sua potencialidade para transmitir doenças.

Os organismos mais comumente utilizados com tal finalidade são as bactérias do grupo coliforme. São as seguintes as principais razões para a utilização deste grupo como indicador de contaminação fecal:

- ✓ Os coliformes apresentam-se em grande quantidade nas fezes humanas;
- ✓ Os coliformes apresentam resistência ligeiramente superior à maioria das bactérias patogênicas intestinais;
- ✓ Os mecanismos de remoção dos coliformes nos corpos d'água, nas estações de tratamento de água e nas estações de tratamento de esgotos são os mesmos mecanismos de remoção das bactérias patogênicas;
- ✓ As técnicas bacteriológicas para a detecção de coliformes são rápidas e econômicas.

Os principais indicadores de contaminação fecal comumente utilizados são: Coliformes Totais, Coliformes Termotolerantes e *Escherichia coli*.

Neste trabalho, o indicador utilizado será o subgrupo dos Coliformes Termotolerantes, que corresponde às bactérias indicadoras de organismos originários predominantemente do trato intestinal humano e outros animais.

3. Otimização do Sistema de Disposição Oceânica do Rio Vermelho

Neste terceiro capítulo serão apresentados todos os cálculos e modelos utilizados para a otimização do sistema de disposição oceânica de Salvador. Primeiramente serão otimizadas as dimensões da tubulação difusora, através da Rotina de Rawn. Em seguida, a angulação desta mesma tubulação em relação às correntes hidrodinâmicas predominantes e sua distância à costa necessária para que os padrões de qualidade ambiental estabelecidos pela Resolução CONAMA 274/2000 sejam atendidos, serão analisadas através do *software* SisBaHiA[®]. Para que não haja um excesso de mapas e gráficos neste projeto, apenas os resultados dos cenários mais representativos e conservadores serão apresentados, sempre com a devida identificação.

3.1. Dimensionamento da Tubulação Difusora

O objetivo dos cálculos feitos a seguir é otimizar a tubulação difusora e obter o perfil da carga hidráulica ao longo da mesma, para então indicar a altura necessária para o recalque do esgoto na chaminé de equilíbrio em cada cenário de estudo.

3.1.1. Caracterização do Emissário do Rio Vermelho

Como já apresentado, o Emissário do Rio Vermelho se localiza na vertente oceânica de Salvador, porém próximo à Baía de Todos os Santos. Possui uma extensão total de 3.369 m, sendo 1.019 m em terra e 2.350 m em mar, com um diâmetro de 1,75 m. A tubulação difusora

encontra-se a uma profundidade de 27 m em relação ao nível da maré máxima média e possui uma extensão de 350 m.

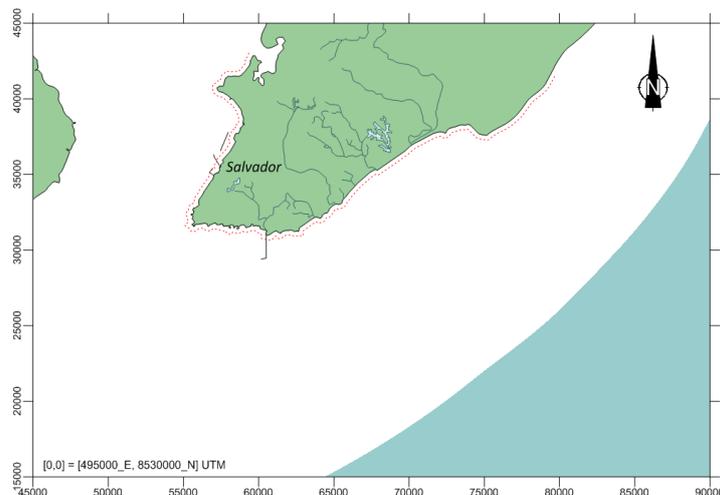


Figura 8 – O Emissário Submarino do Rio Vermelho. A linha vermelha tracejada demarca a região de balneabilidade, distante 300 m em relação à costa.

Atualmente, a tubulação difusora é composta por 70 difusores laterais e 2 frontais. Para fins de praticidade dos cálculos seguintes, esses 2 difusores serão considerados como laterais. Cada difusor é composto por um único orifício de 15 cm e estão espaçados de 5m. Como pode ser visto na Figura 8, a tubulação difusora possui uma inclinação de N257°, de modo que fique perpendicular às correntes predominantes da região. O objetivo é permitir uma melhor diluição do esgoto nas águas marinhas. Esta angulação será analisada mais adiante. A Tabela 3 resume as características principais do ESRV.

Tabela 3 – Características principais do SDORV.

Características	Símbolo	Valor	Unidade
Comprimento do ETRV*	L_t	1.019	m
Comprimento do ESRV**	L_m	2.000	m
Comprimento da Tubulação Difusora	L_{TD}	350	m
Diâmetro da Tubulação Difusora	D	1,75	m
Área da Tubulação Difusora	A	2,41	m^2
Vazão Mínima	Q_{min}	5,10	m^3/s
Vazão Máxima de Projeto	Q_{max}	8,30	m^3/s
Diâmetro dos Orifícios Difusores	d	0,15	m
Área dos Orifícios Difusores	a	0,02	m^2
Espaçamento entre cada seção de Difusor	L	5,00	m
Azimute da Tubulação Difusora	α	257	°

*ETRV – Emissário Terrestre do Rio Vermelho.

**ESRV – Emissário Submarino do Rio Vermelho excluindo a tubulação difusora.

3.1.2. Preparação para a Rotina de Rawn

Antes que a Rotina de Rawn possa ser utilizada, alguns cálculos devem ser feitos e limites estabelecidos.

Segundo Gonçalves & Souza (1997), a soma das áreas das seções dos orifícios difusores a jusante de uma determinada seção do tubo principal não pode ser superior à área dessa seção. Uma boa prática é considerar essa soma entre 1/3 (33%) e 2/3 (66%) da área do tubo principal ou, no máximo, 4/5 (80%) para casos extremos. Estas limitações servem para garantir que a velocidade nos orifícios difusores sejam maiores do que na tubulação principal, mas ao mesmo tempo garantir o escoamento do efluente para o meio externo.

Considerando 66% como limitação superior, o somatório das áreas dos difusores deve ser no máximo de:

$$\sum_i^n a_i = A \times 0,66 = 2,41 \times 0,66 = 1,60m^2 \quad (5)$$

Dessa forma, o número máximo de orifícios é:

$$n = \frac{\sum_i^n a_i}{a} = \frac{1,60}{0,02} \cong 90 \text{ orifícios} \quad (6)$$

Dado que o espaçamento entre cada orifício é de 5m, o comprimento da tubulação deve ser:

$$L_{TD} = (90 - 1) \times 5 = 445m \quad (7)$$

Um bom dimensionamento da tubulação difusora visa a manter vazões iguais ao longo de todos os difusores. Portanto, o ideal seria que essas vazões unitárias (q_i) fossem iguais a:

$$q_{max} = \frac{Q_{max}}{n} = \frac{8,30}{90} = 0,0922 m^3/s \quad (8)$$

Pela equação da continuidade, a velocidade (v_i) em cada orifício será de:

$$v_{max} = \frac{q_{max}}{a} = \frac{0,0922}{0,02} = 5,22 \text{ m/s} \quad (9)$$

Dada que a profundidade da tubulação difusora é de 27 m em relação ao nível da maré máxima média, a pressão (P_{ext}) a qual a tubulação estará sujeita é de:

$$P_{ext} = d_{as} \times 27 = 1,025 \times 27 = 27,68 \text{ mca} \quad (10)$$

Onde:

mca = Metros de Coluna D'água

Para que a vazão máxima final escoe para o exterior é necessário existir uma carga total no interior do tubo, além dessa pressão máxima externa, capaz de vencer as perdas de carga do orifício. Esta energia em excesso seria a carga de velocidade de saída do orifício difusor. Tomando como igual a 1 o coeficiente de perda de carga localizada do orifício difusor (k), teríamos:

$$E_1 = k \frac{v_1^2}{2g} = 1 \times \frac{5,22^2}{2 \times 9,81} = 1,39 \text{ mce} \quad (11)$$

Onde:

mce = Metros de Coluna do Efluente;

O índice “1” (em E e v) diz respeito à numeração dos 90 difusores, tendo esta contagem início no difusor mais a jusante.

A vazão por um único orifício difusor pode ser posta sob a forma:

$$q_i = C_i a_i \sqrt{2gE_i} \quad (12)$$

Onde:

C_i = um coeficiente de vazão;

E_i = variação da carga total através do orifício do difusor que se está considerando.

Para orifícios abertos diretamente na parede, com entrada arredondada e de diâmetro menor que 1/10 do diâmetro do tubo principal, determinações de laboratório indicam que (Gonçalves & Souza, 1997):

$$C_i = 0,975 \left(1 - \frac{v_i^2}{2gE_i}\right)^{3/8} \quad (13)$$

Onde:

V = velocidade na tubulação difusora;

De acordo com a teoria, a vazão na tubulação difusora a montante do orifício 1 (mais a jusante) será igual à vazão unitária dos difusores (0,0922 m³/s), já que a idéia é se ter todos os jatos de efluente com a mesma vazão. Sendo a vazão na tubulação principal imediatamente a montante do orifício 1 igual à vazão neste orifício, a velocidade na tubulação será:

$$V_1 = \frac{Q_1}{A_1} = \frac{0,0922}{2,41} = 0,0383 \text{ m/s} \quad (14)$$

Onde:

Q_1 = vazão na tubulação principal imediatamente a montante do orifício de ordem 1;

V_1 = velocidade na tubulação principal imediatamente a montante do orifício de ordem 1;

A_1 = área da tubulação principal imediatamente a montante do orifício de ordem 1;

Pode-se então, calcular o coeficiente de vazão C_1 :

$$C_1 = 0,975 \left(1 - \frac{0,0383^2}{2 \times 9,81 \times 1,39}\right)^{3/8} = 0,975 \quad (15)$$

E a vazão unitária no orifício de ordem 1 fica sendo:

$$q_1 = 0,975 \times 0,02 \times \sqrt{2 \times 9,81 \times 1,39} = 0,0899 \text{ m}^3/\text{s} \quad (16)$$

Verificando-se um valor bem próximo ao teórico (0,0922 m³/s). A diferença entre esses dois valores se dá pela introdução do coeficiente de vazão C_i , o qual representa uma perda de carga nos difusores.

Caminhando-se para montante, o próximo passo seria calcular o valor de E_2 , que corresponde à soma de E_1 com a perda de carga entre os orifícios 1 e 2.

$$E_2 = E_1 + h_{f1} = 1,39 + 4,73 \times 10^{-7} \cong 1,39 \quad (17)$$

A perda de carga h_{f1} é calculada a partir da equação de Darcy-Weisbach, mostrada mais adiante no trabalho.

Calculando-se C_2 , torna-se possível achar o valor de q_2 :

$$C_2 = 0,975 \left(1 - \frac{V_1^2/2g}{E_2}\right) \cong 0,975 \quad (18)$$

$$q_2 = C_2 a_2 \sqrt{2gE_2} \cong 0,0899 \quad (19)$$

O próximo passo é calcular o incremento de velocidade do efluente na tubulação principal entre as seções imediatamente a montante do orifício 1 e 2, para então achar o valor de V_2 . No entanto, antes disto é preciso corrigir o valor da velocidade V_1 , modificado pela introdução do coeficiente C_1 .

$$V_1 = \Delta V_1 = \frac{q_1}{\pi/4 D^2} = 0,0374 \text{ m/s} \quad (20)$$

$$V_2 = V_1 + \Delta V_2 = 0,0374 + \frac{q_2}{\pi/4 D^2} \cong 0,0748 \text{ m/s} \quad (21)$$

E assim sucessivamente até o orifício mais a montante.

3.1.3. Rotina de Rawn

Para que seja possível analisar os resultados da alteração das características dos orifícios difusores e da tubulação principal, foi utilizada a rotina de Rawn – descrita no Anexo 1, a qual permite elaborar um programa de computação para o cálculo hidráulico dos difusores. A idéia é estender os cálculos feitos para os orifícios 1 e 2 para montante da tubulação difusora.

Os resultados deste procedimento para a tubulação difusora já com 90 difusores, porém com todos os seus diâmetros de 15 cm são resumidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Resumo dos resultados da Rotina de Rawn para a tubulação difusora com 90 difusores de 15 cm.

Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Vazão afluentes ao ESRV	Q_{afluente}	8,300	m ³ /s
Somatório das vazões efluentes dos difusores	Σq_i	7,743	m ³ /s
Diferença entre a vazão afluente e efluente	$Q - \Sigma q_i$	0,558	m ³ /s
Média da vazão efluente dos difusores	q_{med}	0,086	m ³ /s
Vazão efluente unitária máxima	q_{max}	0,090	m ³ /s
Vazão efluente unitária mínima	q_{min}	0,079	m ³ /s
Médias das velocidades na tubulação principal	V_{med}	1,663	m/s
Velocidade máxima nas seções da tubulação principal	V_{max}	3,229	m/s
Velocidade mínima nas seções da tubulação principal	V_{min}	0,037	m/s
Média das velocidades unitárias nos difusores	v_{med}	4,868	m/s
Velocidade máxima nos difusores	v_{max}	5,088	m/s
Velocidade mínima nos difusores	v_{min}	4,466	m/s
Perda de carga na tubulação difusora*	Σh_{fi}	0,092	m
Orifícios dentro dos limites de 33% e 80%		45	-

*Os cálculos para a perda de carga foram feitos pela equação de Darcy-Weisbach. O coeficiente f desta equação foi calculado pela fórmula implícita de Colebrook, apresentada no Capítulo 3.1.5.2

O primeiro fato a ser observado é que o somatório das vazões unitárias nos 90 difusores não é igual à vazão afluente ao emissário submarino. A razão para este fato é que as perdas de carga ao longo da tubulação difusora impedem que toda a vazão seja expelida. Sendo assim, está ocorrendo um acúmulo de efluente no emissário, o qual poderá se propagar até a estação elevatória, podendo causar grandes prejuízos.

Imediatamente antes do início do emissário terrestre, há uma chaminé de equilíbrio. Havendo um acúmulo de efluente, o nível d'água desta chaminé irá se elevar, aumentando a pressão. Este aumento de pressão poderá promover a energia necessária para que o excesso de

efluente vença as perdas de carga, escoando para o ambiente externo ao emissário. No entanto, se a chaminé de equilíbrio não possuir altura suficiente, poderá ocorrer um extravasamento.

Vemos que esse acúmulo de volume de efluente é de $0.56 \text{ m}^3/\text{s}$, valor muito elevado, e portanto há a necessidade de uma modificação dimensional. Duas soluções podem ser apresentadas:

- i. Aumentar o diâmetro da tubulação principal a partir de um certo trecho, diminuindo assim as perdas de cargas;
- ii. Aumentar o diâmetro dos orifícios difusores a partir de um certo trecho, fazendo com que as perdas de cargas nestes sejam minimizadas.

Além disso, observa-se que apenas metade dos difusores encontram-se dentro do limite de $1/3$ e $4/5$, que relaciona o somatório da área dos orifícios a jusante de uma seção e a área desta. No caso, os últimos 45 orifícios se encontram abaixo do limite de $1/3$. Duas soluções são possíveis:

- i. Diminuir o diâmetro da tubulação principal a partir de um certo trecho;
- ii. Aumentar o diâmetro dos difusores a partir de um certo trecho.

Observando as soluções acima apresentadas, pode-se parecer que as duas soluções “i’s” são contraditórias, o que não é verdade. O que deve ser feito é a busca por um equilíbrio entre os diâmetros da tubulação principal e dos orifícios difusores, a fim de satisfazer as necessidades de vazão e dos limites da relação entre as áreas.

Pela complexidade desta busca – pois mudando o diâmetro da tubulação difusora seria necessário incluir uma perda de carga pela contração da tubulação, e pelo elevado custo prático de se alterar o diâmetro desta, optou-se neste trabalho por apenas alterar o diâmetro dos difusores. Sendo na prática inviável se ter um olhar individual para cada difusor, esta alteração se deu em grupos de 10 orifícios.

Assim, foram feitas as seguintes alterações para cada grupo de difusores:

Tabela 5 – Modificações em cada grupo de orifícios difusores.

Grupos de orifícios i	d (cm)
90-81	16,5
80-71	16,3
70-61	16,0
60-51	15,7
50-41	15,5
40-31	15,3
30-1	15,0

Os orifícios de montante obtiveram os maiores diâmetros pelo seguinte fato: caminhando-se de jusante (orifício 1) para montante (orifício 90), a vazão na tubulação principal aumenta. Sendo a área desta constante, pela equação da continuidade, temos que a velocidade deve também aumentar.

$$Q^+ = AV^+ \quad (22)$$

Pela Equação 13, vemos que o coeficiente de vazão (C_i) irá diminuir a medida que a velocidade da tubulação principal aumenta e, conseqüentemente, a vazão unitária por difusor também irá diminuir.

$$Q^+ \rightarrow V^+ \rightarrow C_i^- \rightarrow q_i^- \quad (23)$$

Para amortecer essa queda da vazão unitária a medida que caminha-se para montante, devemos aumentar o diâmetro dos difusores, pois pela Equação 12:

$$a_i^+ \rightarrow q_i^+ \quad (24)$$

Os resultados destas modificações são resumidos na tabela a seguir:

Tabela 6 – Resumo dos resultados da Rotina de Rawn depois das modificações nos orifícios.

Característica	Símbolo	Valor	Unidade
Vazão afluentes ao ESRV	Q_{afluente}	8,300	m^3/s
Somatório das vazões efluentes dos difusores	Σq_i	8,305	m^3/s
Diferença entre a vazão afluyente e efluente	$Q - \Sigma q_i$	-0,005	m^3/s
Média da vazão efluente dos difusores	q_{med}	0,092	m^3/s
Vazão efluente unitária máxima	q_{max}	0,097	m^3/s
Vazão efluente unitária mínima	q_{min}	0,089	m^3/s
Médias das velocidades na tubulação principal	V_{med}	1,723	m/s
Velocidade máxima nas seções da tubulação principal	V_{max}	3,453	m/s
Velocidade mínima nas seções da tubulação principal	V_{min}	0,037	m/s
Média das velocidades unitárias nos difusores	v_{med}	4,844	m/s
Velocidade máxima nos difusores	v_{max}	5,088	m/s
Velocidade mínima nos difusores	v_{min}	4,346	m/s
Perda de carga na Tubulação Difusora	Σh_{fi}	0,101	m
Orifícios dentro dos limites de 33% e 80%		46	-

Agora sim, o somatório das vazões unitárias é igual à vazão máxima afluyente ao ESRV, não havendo acúmulo de efluente e, conseqüentemente, protegendo a estação a montante. No entanto, 44 dos difusores ainda permanecem não atendendo ao critério dos limites, apresentando um valor inferior a 1/3. No entanto, sabendo que esses limites impostos inicialmente servem apenas como uma forma de garantir que as velocidades de saída nos difusores não sejam inferiores a da tubulação principal e o escoamento do efluente para o ambiente marinho, dado que a rotina de Rawn permite que se tenha o conhecimento dessas velocidades em cada difusor, apenas a verificação destas já é suficiente.

Também se verifica que as velocidades máxima ($v_{\text{max}} = 5,09 \text{ m/s}$) e mínima ($v_{\text{min}} = 4,35 \text{ m/s}$) estão de acordo com a boa prática.

Os gráficos de velocidade e vazão da tubulação com 72 orifício – Cenário 1 (A_0), 90 orifícios de 15 cm e 90 orifícios com diâmetros variando de 16,5 a 15 cm – Cenário 2 (P_0) encontram-se a seguir.

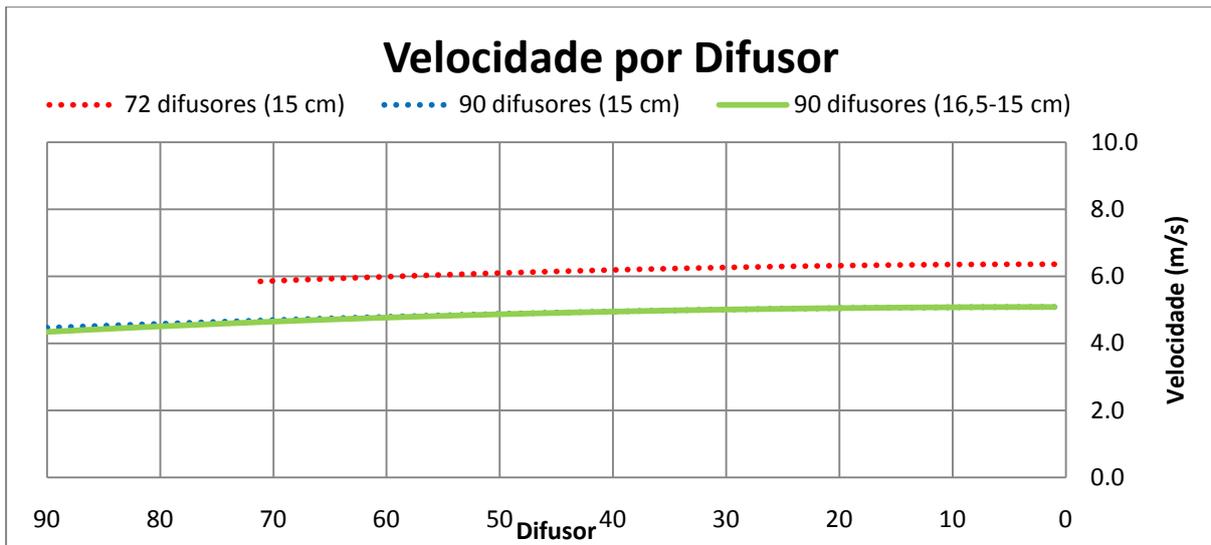


Gráfico 1 – Velocidade por orifício difusor. Note que no eixo das abscissas, 90 ou 72 corresponde ao orifício mais a montante e 1, ao mais a jusante.

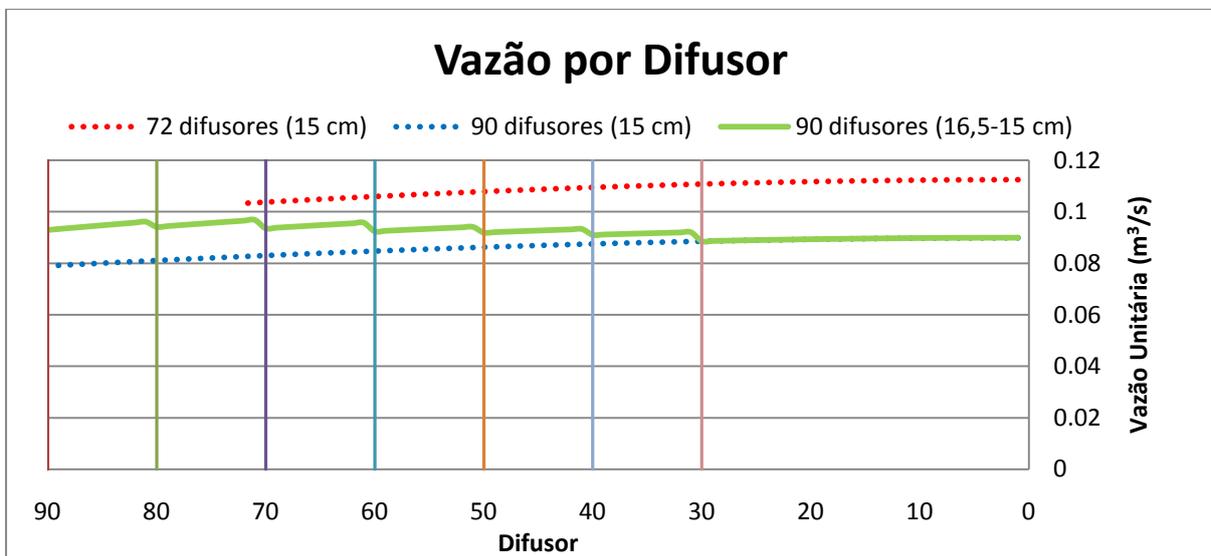


Gráfico 2 – Vazão por Orifício Difusor. Note que no eixo das abscissas, 90 ou 72 corresponde ao orifício mais a montante e 1, ao mais a jusante.

Observa-se que o objetivo de manter as vazões o mais uniforme possível foi atingido. No Gráfico 2 as descontinuidades são resultado do aumento do diâmetro dos grupos de difusores mostrado na Tabela 5.

Embora a vazão para o caso da tubulação com 72 difusores – Cenário 1 (A_0), apresente valores unitários superiores aos demais, por apresentar menos orifícios, o somatório destas vazões obteve um valor inferior a $8,30 \text{ m}^3/\text{s}$. Portanto, este fato revela que atualmente existe, teoricamente, o acúmulo de efluente no sistema.

A seguir, desenvolve-se o perfil hidráulico para a tubulação difusora otimizada, ou seja, para todos os cenários exceto 1 (A_0) e o perfil hidráulico ao longo de todo o emissário para o Cenário 2 (P_0).

3.1.4. Perfil hidráulico da tubulação difusora otimizada

A Equação de Bernoulli pode ser representada da seguinte forma:

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z = H = \text{constante} \quad (25)$$

Cada um desses termos tem a dimensão de comprimento, representando assim, uma certa altura (carga).

$\frac{P}{\rho g}$ - é a carga piezométrica, representando a altura que a coluna de um fluido precisaria ter para gerar a pressão P;

$\frac{V^2}{2g}$ - é a carga de cinética, representando a elevação que um fluido precisaria ter para atingir a velocidade V em queda livre, sem atrito;

z - é a carga geométrica, representando a energia potencial de um fluido.

H , portanto, é a carga hidráulica total do fluxo.

Sendo assim, pode-se plotar estas alturas para a tubulação difusora do ESRV. Tomar-se-á o eixo da tubulação como o nível de referência, e portanto, z será igual a zero metros ($z = 0\text{m}$).

Da Equação 11, temos que a energia mínima necessária no interior do emissário para que o esgoto esco para o ambiente externo é de 1,39 m. Pela rotina de Rawn pôde-se calcular a velocidade no interior da tubulação imediatamente a montante do último orifício ($V_1 \cong 0,04 \text{ m/s}$). Portanto a carga cinética é:

$$\frac{V_1^2}{2g} = \frac{0,04^2}{2 \times 9,81} = 1 \times 10^{-4} \text{ m} \quad (26)$$

Sendo a carga geométrica igual a 0m, a carga piezométrica será:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = 1,39 \quad (27)$$

$$\frac{P_1}{\rho g} = 1,39 - 1 \times 10^{-4} - 0 \cong 1,39 \text{ m} \quad (28)$$

Estes valores são o ponto de partida para os cálculos a montante. Os resultados para todo o trecho da tubulação difusora otimizada são mostrados no gráfico a seguir.

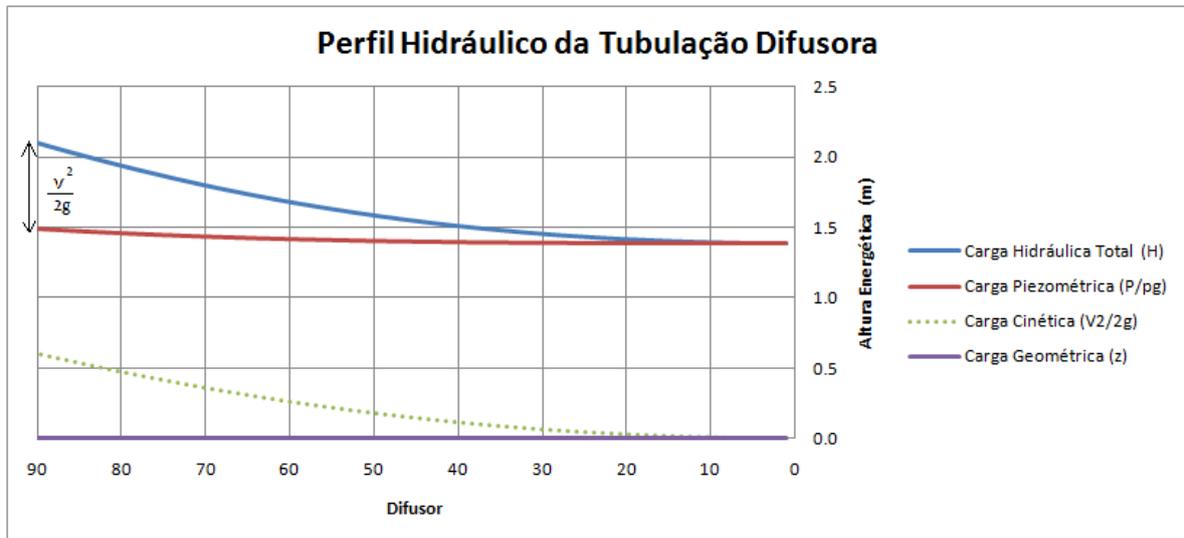


Gráfico 3 – Linha de Carga Hidráulica na tubulação difusora otimizada.

Observa-se que a perda de carga mostrada na Tabela 6 ($\Sigma h_{fi} = 0,1007$ m) é exatamente igual à diferença entre as cargas piezométricas nos difusores 1 e 90, dado que a perda de carga atua sobre este termo da equação de Bernoulli.

É interessante observar também que a diferença entre a Carga Hidráulica Total e a Carga Estática (Carga Piezométrica + Carga Geométrica) é igual a carga cinética. Isto já era de se esperar, pois a Equação de Bernoulli representa justamente essa conversão de energia entre os seus diferentes tipos (energias de Fluxo, Dinâmica e Potencial).

3.1.5. Perfil hidráulico ao longo de todo o emissário

Dando continuidade ao desenvolvimento do perfil hidráulico ao longo de todo o emissário no Cenário 2 (P_0), é necessário calcular as perdas de carga envolvidas em cada parte do resto da tubulação.

3.1.5.1. Perda de carga devido à diferença de densidade

Dado que o esgoto efluente da Tubulação Difusora possui uma densidade diferente da água do mar, é importante considerar nos cálculos a perda que esta diferença causará. Esta pode ser calculada da seguinte forma:

$$h_L = p(d_{as} - d_e) \quad (29)$$

onde:

h_L = perda de carga;

p = profundidade.

Estando a tubulação difusora a uma profundidade de 27 m, $h_L = 0,70$ m.

3.1.5.2. Perdas de carga ao longo dos emissários submarino e terrestre

Para o resto do emissário, as seguintes perdas devem ser consideradas:

I. Perdas Localizadas

A. Perda devido à curva da tubulação difusora

II. Perdas Distribuídas

B. Perda ao longo do restante do emissário submarino

C. Perda ao longo do emissário terrestre

A. Perda devido à curva da tubulação difusora

O fluido em um sistema de tubulação qualquer pode passar por válvulas, curvas suaves ou acentuadas, seções de contração ou expansão etc. Esses componentes causam uma perda de carga, chamada de perdas localizadas, devido à turbulência provocada no escoamento.

No caso do Cenário 1 (A_0), como pode ser visto na Figura 4, existe uma curva de 103° em relação ao eixo do emissário submarino (ou N257 $^\circ$), a qual constitui a perda localizada deste sistema. No entanto, na otimização do sistema esta angulação também foi revista de acordo com as correntes hidrodinâmicas locais. Este estudo, detalhado no Capítulo 3.2.7.1, determinou que para o Cenário 2 (P_0), o ângulo da tubulação difusora em relação ao eixo do emissário submarino deve ser de 167° (N193 $^\circ$).

Esta perda pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g} \quad (30)$$

onde:

h_L = perda de carga localizada;

K_L = coeficiente de perda de carga localizada;

V = velocidade média na seção;

V pode ser calculado pela equação da continuidade. É importante ressaltar que pela Equação 30 observa-se que quanto maior a velocidade, maior será a perda de carga. Dessa forma, utiliza-se a vazão máxima de projeto nos cálculos para se ter uma análise conservativa.

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{8.3}{\pi D^2/4} = 3,45 \text{ m/s} \quad (31)$$

O coeficiente K_L pode ser obtido segundo a seguinte curva:

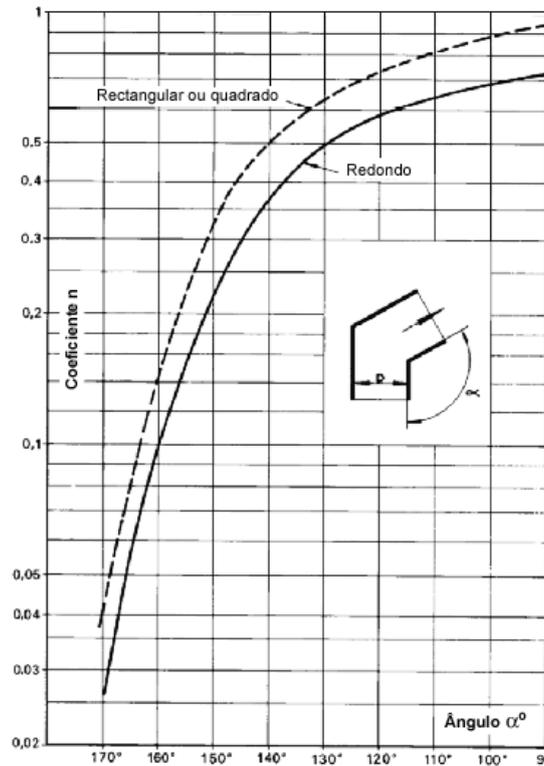


Figura 9 – Perda de Carga em curvas com ângulo obtuso (fonte: Site Soler & Palau – Soluções Inovadoras. Acessado no dia 15/10/2010 às 10:53).

Sendo o ângulo neste caso – Cenário 2 (P_0), igual a 167° , obtêm-se um coeficiente igual a 0,07. Logo $h_L = 0,0425 \text{ m}$.

B. Perda ao longo do restante do emissário submarino

Neste caso, a perda de carga é dita distribuída, pois ocorre devido ao atrito das paredes internas da tubulação com o fluido. Quanto maior for a rugosidade do material das paredes internas, maior será a perda, a qual é calculada por:

$$h_l = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (32)$$

onde:

L = comprimento do emissário submarino;

D = diâmetro interno da tubulação;

V = velocidade média do escoamento ao longo do emissário;

f = coeficiente de Darcy.

f é calculado pela equação de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (33)$$

onde:

ε = coeficiente de rugosidade da tubulação (Concreto = 0,0015 m);

Re = número de Reynolds do escoamento.

Conhecendo-se ε , D e Re , o Diagrama de Moody pode ser utilizado para determinar f . Entretanto, para deixar este processo mais automatizado, pode-se calcular as raízes da Equação 32 pelo método de Newton-Raphson e utilizar como estimativa inicial de f , a aproximação de S. E. Haaland, dada por:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \cong -1,8 \log \left[\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} \right)^{1,11} \right] \quad (34)$$

Desta forma, $h_L = 13,16$ m.

C. Perda ao longo do emissário terrestre

Pelo mesmo procedimento anterior, a perda de carga distribuída ao longo do emissário terrestre é de $h_L = 6,7$ m.

A Tabela 7 resume as perdas de carga de cada sistema para o Cenário 2 (P_0):

Tabela 7 – Resumo das perdas de carga ao longo do Emissário para o Cenário 2 (P_0).

Perda de Carga...	Símbolo	Valor (m)
...na Tubulação Difusora	Σh_{L_TD}	0,1007
...na TD* devido à diferença de densidade	$\Sigma h_{L_}\Delta d$	0,7020
...na curva da TD*	h_{L_Curva}	0,0425
...no Emissário Submarino	Σh_{L_ES}	13,1632
...no Emissário Terrestre	Σh_{L_ET}	6,7067

*TD = Tubulação Difusora

A partir de então pode-se construir o gráfico do perfil hidráulico ao longo de todo o emissário.

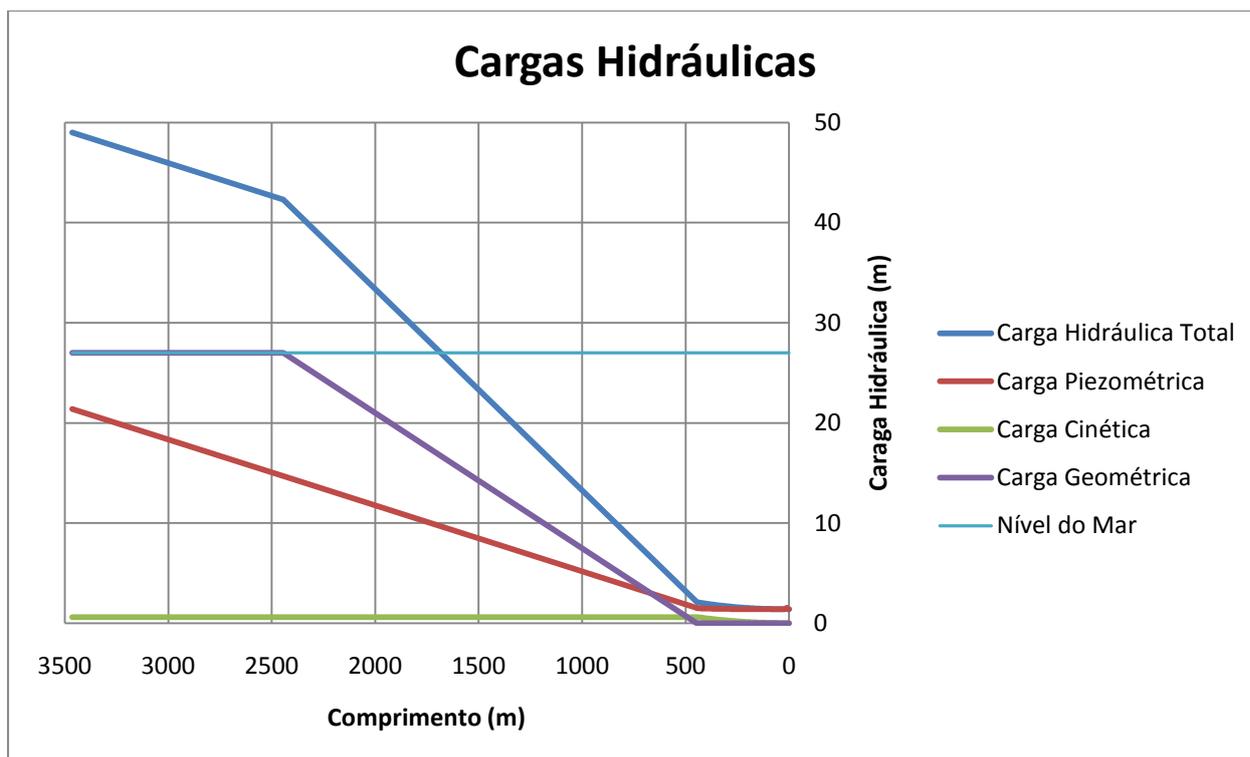


Gráfico 4 – Perfil hidráulico do emissário para o Cenário 2 (P_0).

É importante observar que as grandes perdas ocorrem ao longo dos emissários submarino e terrestre.

O Gráfico 4 mostra o perfil hidráulico para o Cenário 2 (P_0) do SDORV, permitindo-se achar qual será a altura da linha d'água na chaminé de equilíbrio, necessária para fazer com que o esgoto vença todas as perdas de carga do sistema a jusante e escoe para fora do emissário pelos orifícios difusores.

Para esta situação em que não há um aumento da extensão do emissário submarino, mas apenas a otimização da linha difusora, observa-se que o nível d'água na chaminé de equilíbrio deve possuir uma diferença de 49,01 m em relação ao nível do eixo da tubulação difusora. Sabendo-se que esta se encontra a uma profundidade de 27 m, em relação ao nível do mar, esta altura deve ser, portanto, de 22,01 m.

A Tabela 8 resume os resultados encontrados para as alturas das chaminés de equilíbrio de todos os cenários simulados neste trabalho.

Tabela 8 – Altura necessária das chaminés de equilíbrio para cada solução porposta.

Cenário	Altura da Chaminé de Equilíbrio (m)	Incremento* (m)
1 (A_0)	23,25	0
2 (P_0)	22,01	-1,24
3 (P_700)	26,63	3,37
4 (P_1000)	28,60	5,35
5 (P_1500)	31,93	8,68
6 (P_2000)	35,23	11,98
7 (P_2500)	38,55	15,29

*Incremento em relação à situação atual do SDORV (Cenário 1 (A_0)).

É interessante observar o fato de que a situação otimizada sem um prolongamento do emissário - Cenário 2 (P_0), possui um incremento negativo da chaminé de equilíbrio. Isto ocorre, porque nesta situação há um aumento do ângulo formado entre o emissário e a tubulação difusora, o que faz com que a perda de carga localizada nesta curva diminua. O motivo da rotação da tubulação difusora é explicada mais adiante no trabalho.

3.2. Posicionamento da tubulação difusora

Em 2008, um estudo da modelagem da área de influência do ESRV para suporte ao monitoramento ambiental foi pedido pela empresa Hydros Engenharia & Planejamento Ltda., em consórcio com a empresa CH2MHill, à Coppetec. Sendo assim, o professor Paulo Cesar Colonna Rosman, da Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica – PEnO/COPPE, já tinha disponível uma série de informações e modelos que foram aproveitados neste trabalho.

Na época, foram realizadas duas campanhas de medições de dados ambientais, sendo uma durante o verão e outra durante o inverno. A região de interesse, a mesma deste trabalho, com os pontos de monitoramento para o suporte do estudo está representada na Figura 10.



Figura 10 – Região do ESRV com localização dos pontos de amostragem para monitoramento (fonte: Rosman, 2010).

3.2.1. Malha

A malha é a discretização espacial do meio contínuo através da definição geométrica de elementos finitos. Para cada nó destes elementos, serão resolvidas as equações governantes do processo, mostradas no Capítulo 1.5.3.1.

A malha desenvolvida na época abrangeu toda a área da Baía de Todos os Santos – BTS (Figura 11). Esse domínio foi discretizado em 3 dimensões por uma pilha de 21 malhas de elementos finitos biquadráticos, contendo um total de 21 x 1499 elementos e 21 x 6858 nós de cálculo.

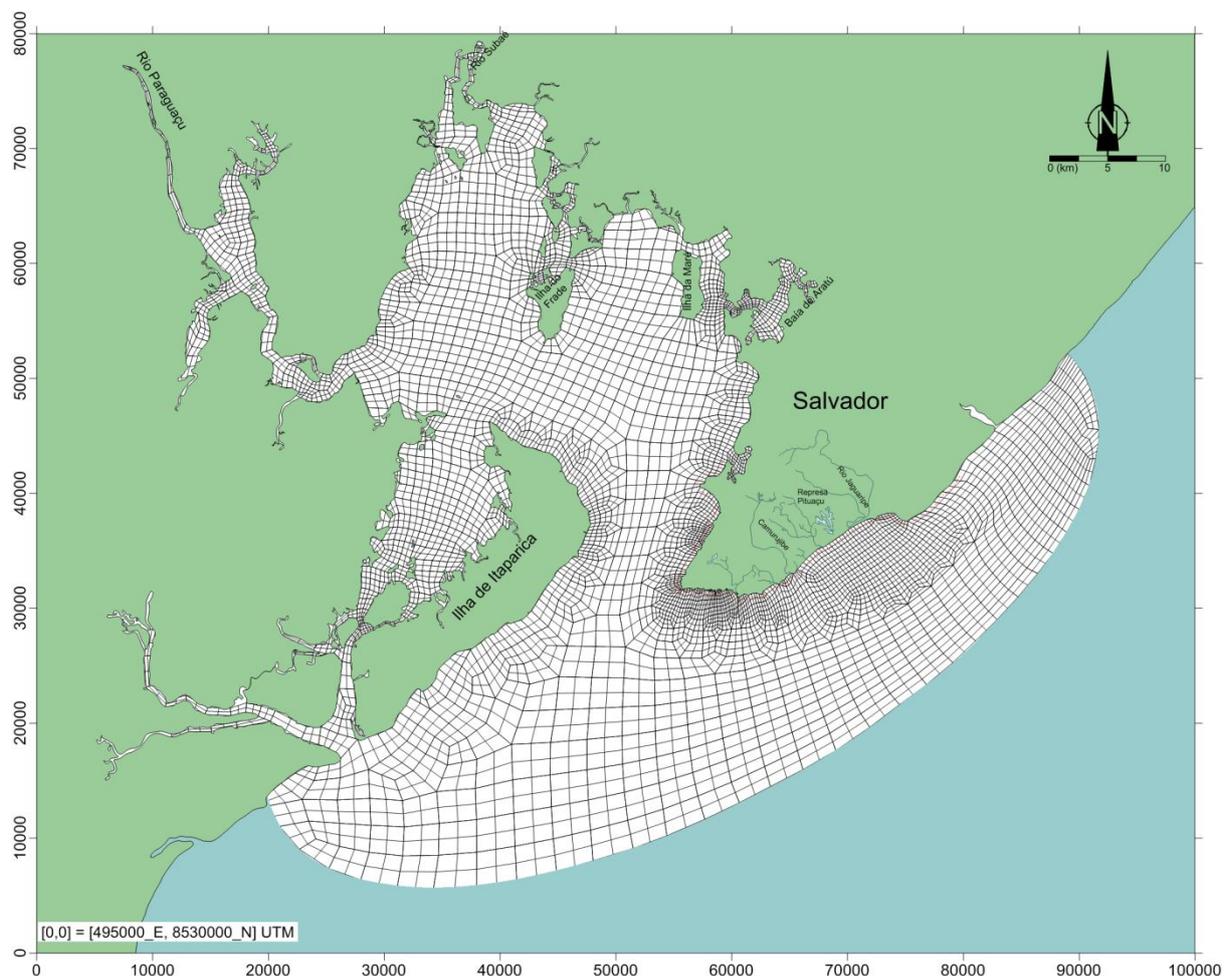


Figura 11 – Malha de elementos finitos utilizada.

É importante observar o alto nível de detalhamento que se deu próximo à região do ESRV. Quanto maior este refinamento, maior será a acurácia dos resultados do modelo. No entanto, é inviável estender este detalhamento para todo o domínio, pois o esforço computacional pode vir a se tornar muito grande.

3.2.2. Batimetria

Os dados de batimetria foram retirados de cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil. Os dados das cartas disponíveis para a BTS e arredores foram digitalizados e fornecidos pela empresa Hydros.

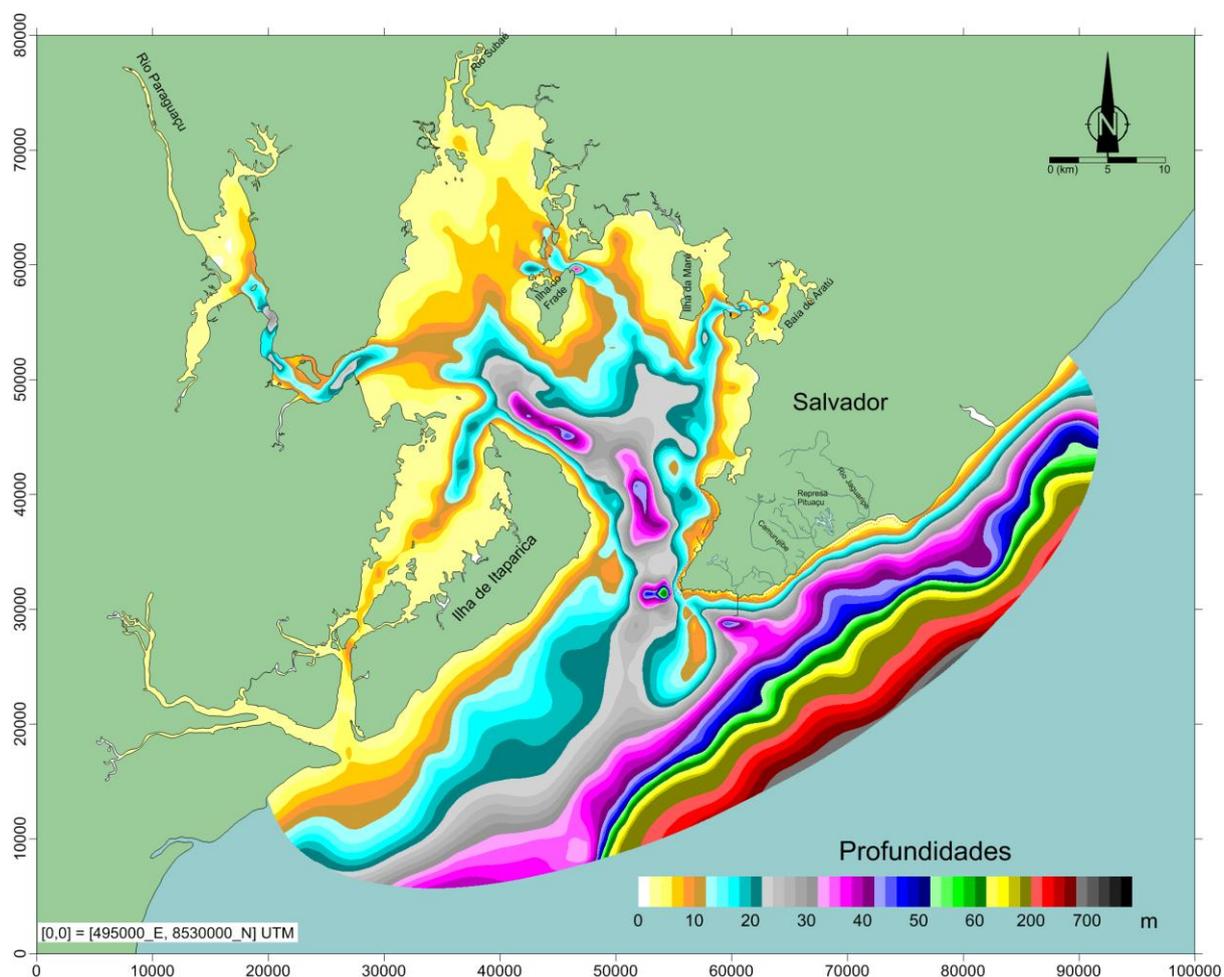


Figura 12 – Batimetria como vista pelo modelo, com base nos dados da malha de discretização do domínio da BTS considerado.

3.2.3. Dados de maré

As curvas de marés utilizadas na modelagem foram produzidas a partir dos registros de maré medidos nas duas campanhas pelo Consórcio Hydros-CH2MHill e podem ser observadas nos Gráfico 5 e Gráfico 6. Os períodos de modelagem hidrodinâmica foram do dia 16/02/2008 às 10:30h até 01/03/2008 16:30h para o cenário de verão e de 28/05/2008 às 10:40h até 16/06/2008 13:40h para o cenário de inverno.

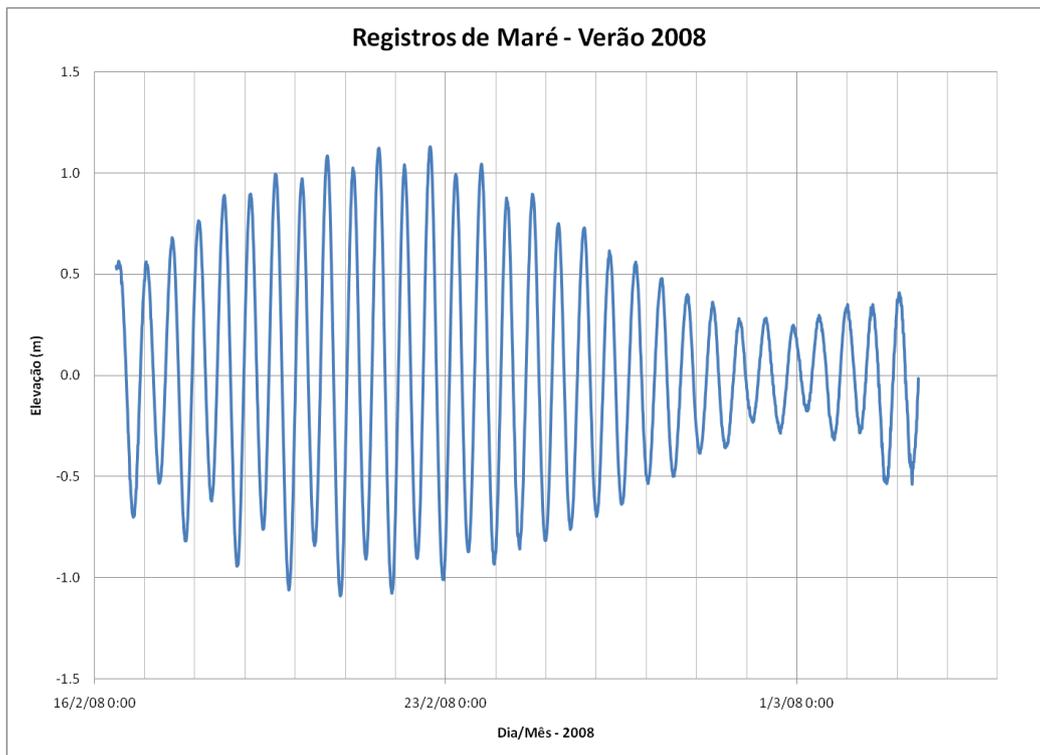


Gráfico 5 – Níveis de maré registrados na Campanha de Verão de 2008 na região do ESRV. Os valores acima estão referidos ao nível médio do mar na região, durante o período de medição.

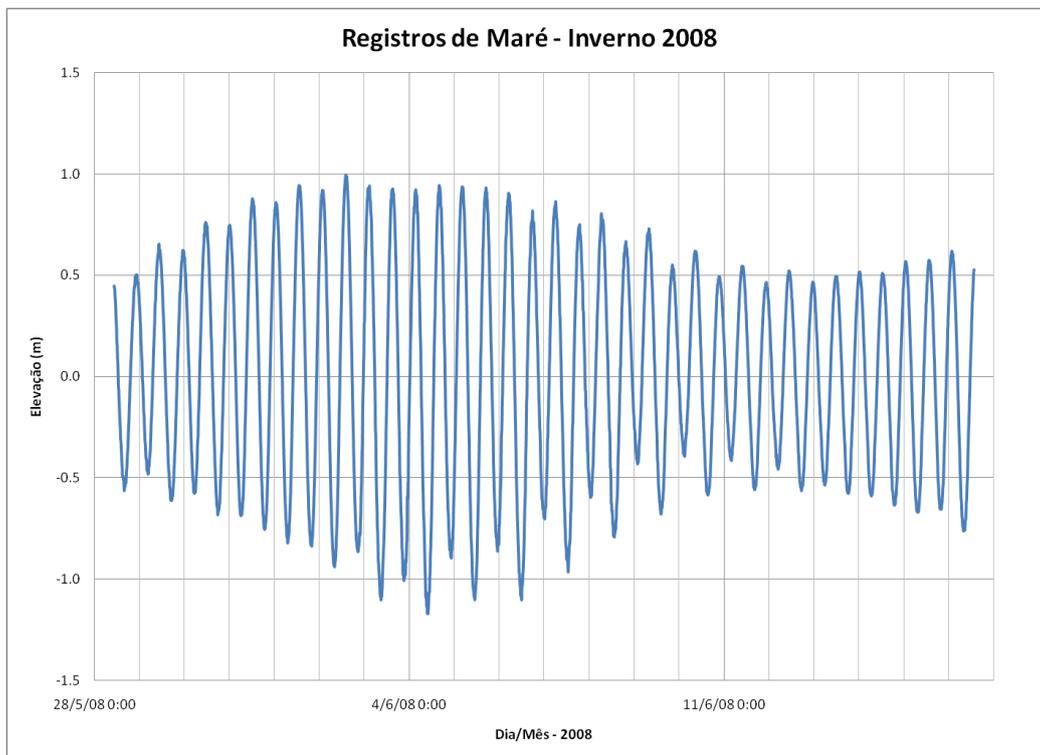


Gráfico 6 – Níveis de maré registrados na Campanha de Inverno de 2008 na região do ESRV. Os valores acima estão referidos ao nível do mar na região, durante o período de medição.

3.2.4. Dados de vento

Os dados de vento utilizados foram medidos na estação anemométrica de Amaralina – Salvador em fevereiro e junho de 2008. Ambos foram utilizados na modelagem hidrodinâmica para os cenários de verão e inverno, respectivamente.

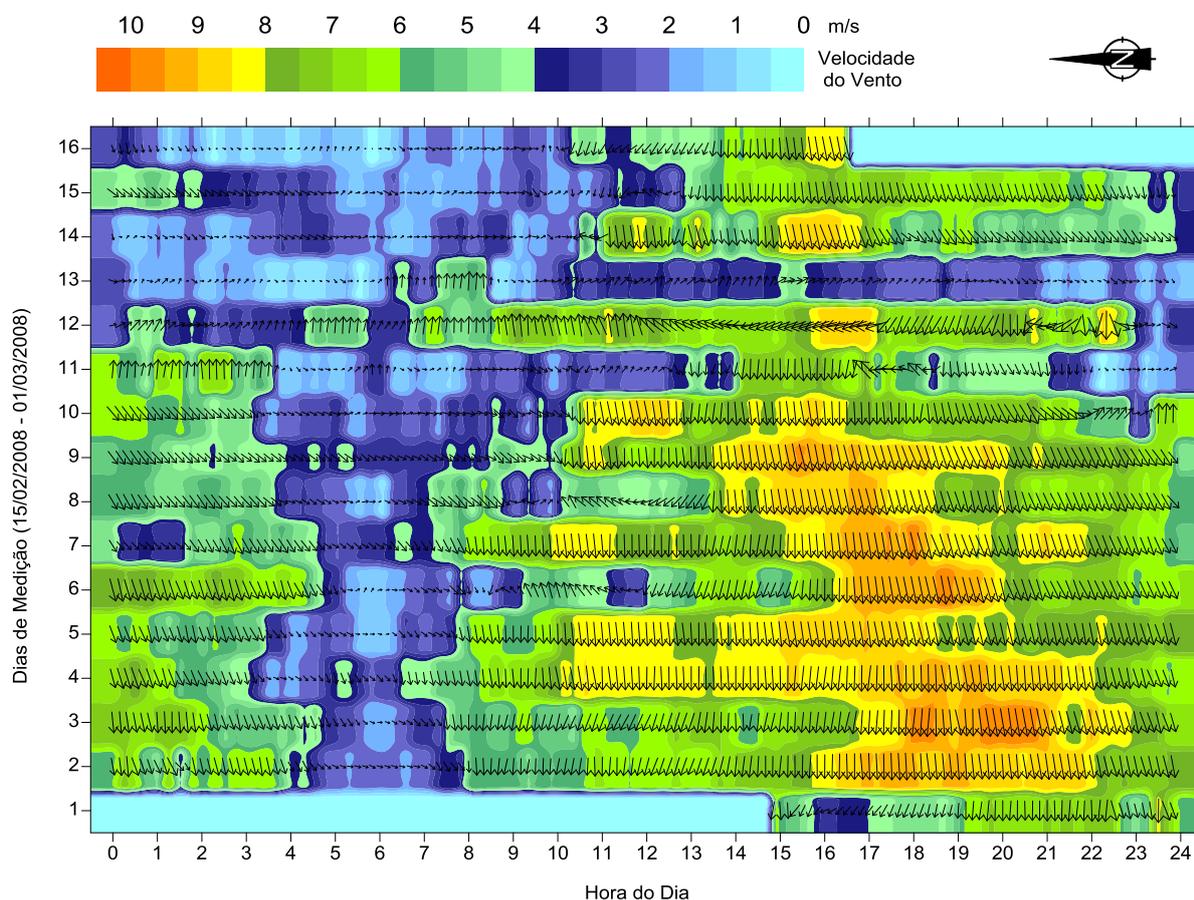


Figura 13 – Velocidade e direção do vento convertida para altura padrão de 10 m acima do NMM⁴, a partir de valores medidos em fevereiro de 2008 na estação de Amaralina (13° 00' 54.5" S / 38o 28' 47.7" W). Note que a seta do Norte não aponta para cima como é usual.

No verão, ressalta-se a franca dominância dos ventos de Este, com grande persistência. Pode também ser observado um padrão de brisa com fracas intensidades e inversão de sentido do vento durante a madrugada.

⁴ NMM = Nível Médio do Mar

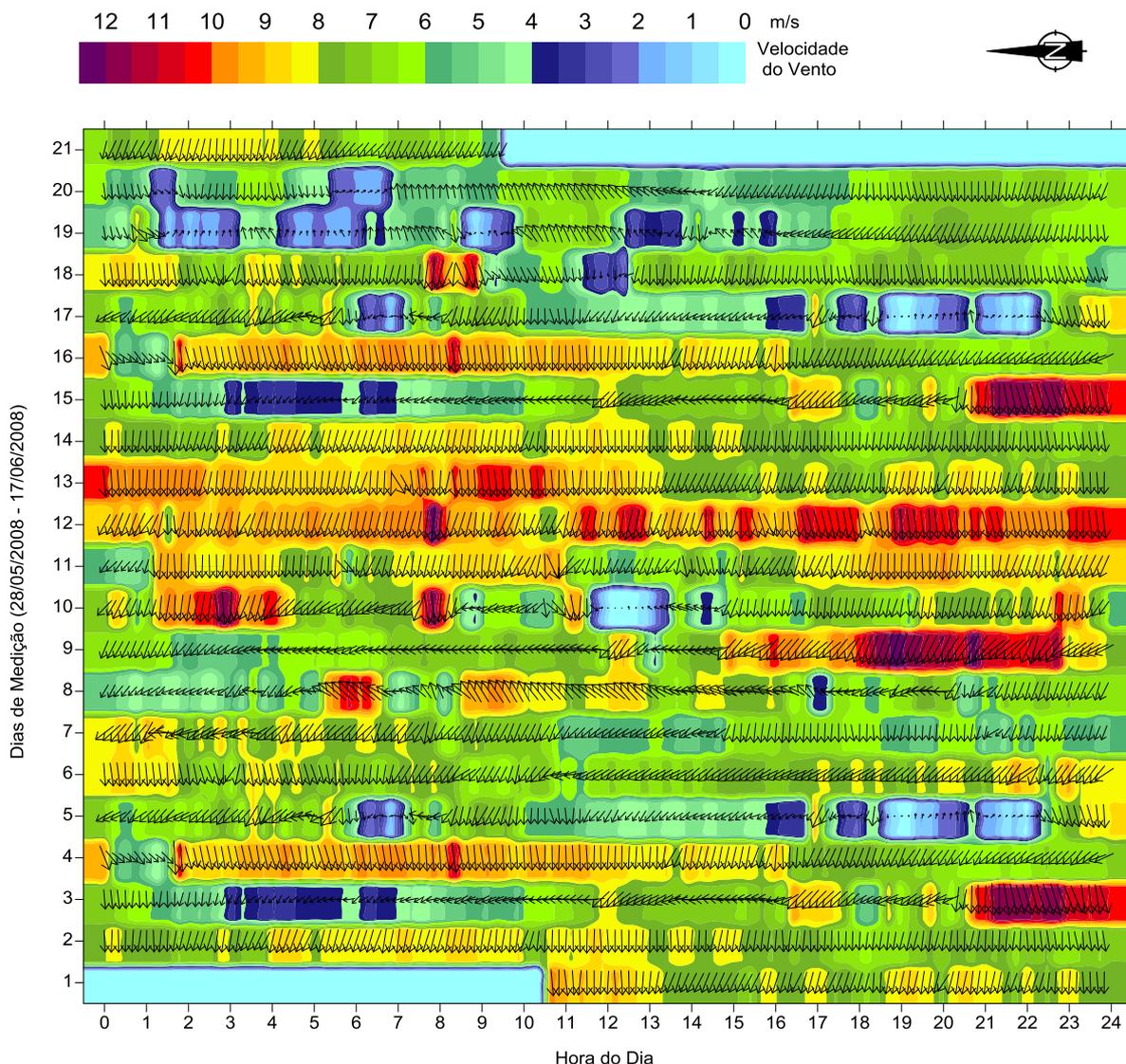


Figura 14 – Velocidade e direção do vento no inverno convertida para a altura padrão de 10 m acima do NMM, a partir de valores medidos em junho de 2008 na estação de Amaralina (13° 00' 54.5" S / 38° 28' 47.7" W). Novamente, note que a seta do Norte não aponta para cima como é usual.

Para o período de inverno, observa-se uma maior frequência de ventos provenientes de E, ESE e SE.

3.2.5. Vazão efluente do ESRV

As curvas de vazão foram fornecidas pelo Consórcio Hydros-CH2MHill no estudo feito em 2008. Nesta época, a vazão média horária máxima foi durante o período de Inverno com um valor de 6,59 m³/s. De forma a tornar este trabalho o mais conservativo possível, igualou-se esta vazão à vazão máxima de projeto (8,30 m³/s). O resultado das curvas de verão e inverno estão mostrados abaixo:

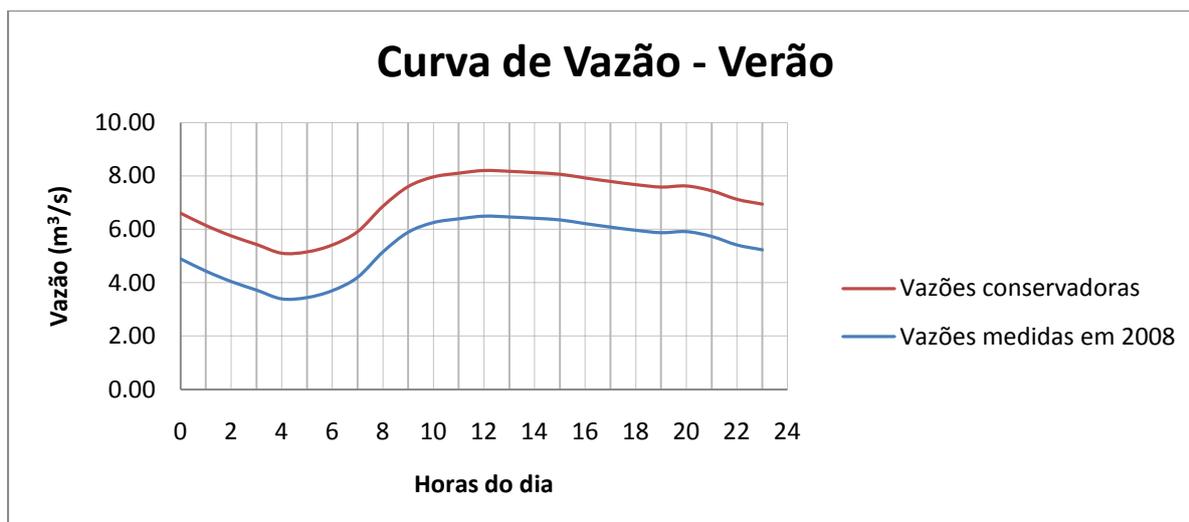


Gráfico 7 – Vazões médias horárias medidas em 2008 e conservadoras consideradas como efluentes do ESRV para o período de verão.

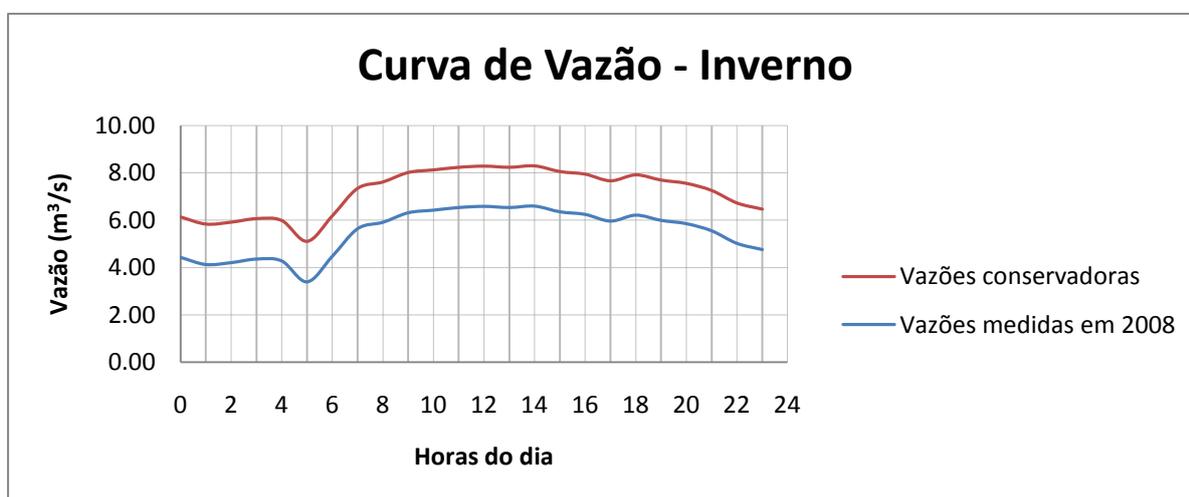


Gráfico 8 – Vazões médias horárias medidas em 2008 e conservadoras consideradas como efluentes do ESRV para o período de inverno.

As concentrações de coliformes termotolerantes para cada período também foram medidas durante as campanhas e estão apresentadas abaixo.

Tabela 9 – Concentração de Coliformes Termotolerantes em cada período.

Período	Concentração de Coliformes Termotolerantes (NMP/100mL)
Verão	3×10^7
Inverno	7×10^6

3.2.6. Modelagem Hidrodinâmica

Uma vez com todos os dados de batimetria, marés, ventos e vazões efluentes do ESRV reunidos, pode-se dar início à modelagem hidrodinâmica com o SisBaHiA[®]. Este é o

processo mais penoso da modelagem, demandando uma grande quantidade de tempo para cada rodada.

Para melhor se aproximar da realidade da circulação das correntes hidrodinâmicas, é necessário fazer a calibração de cada modelo. Esta etapa se resume em fazer uma série de rodadas e em cada uma, comparar os resultados obtidos pelo modelo hidrodinâmico e as medições feitas em campo, até se ter o nível de semelhança desejado ou aceitável.

Este processo também já havia sido feito anteriormente no projeto de 2008 e pôde ser aproveitado neste trabalho. Os Gráfico 9 ao Gráfico 12 mostram as comparações das circulações hidrodinâmicas na superfície e a 5 metros de profundidade nos dois períodos em estudo.

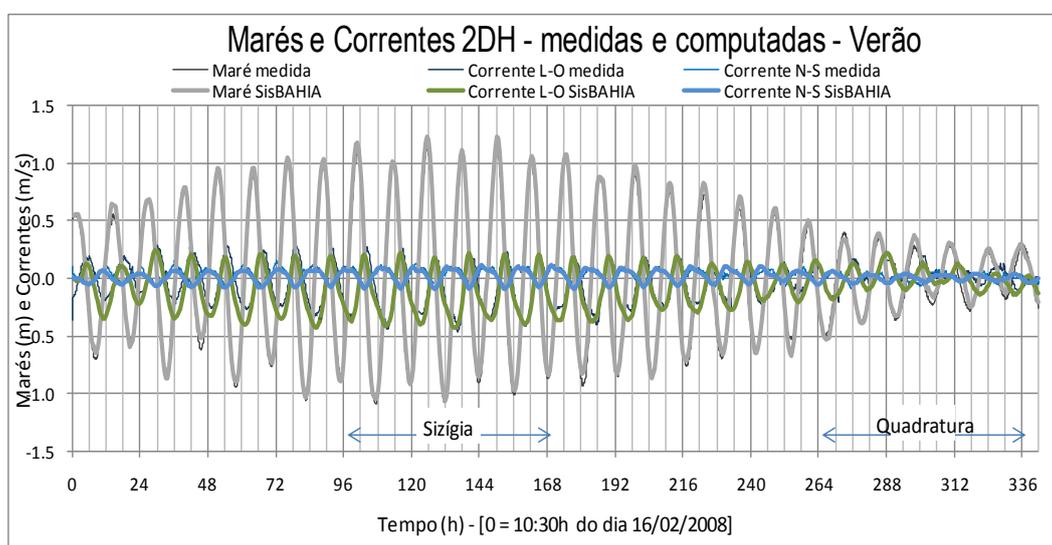


Gráfico 9 – Calibração da elevação da maré e das correntes L-O e N-S na superfície para o período de verão.

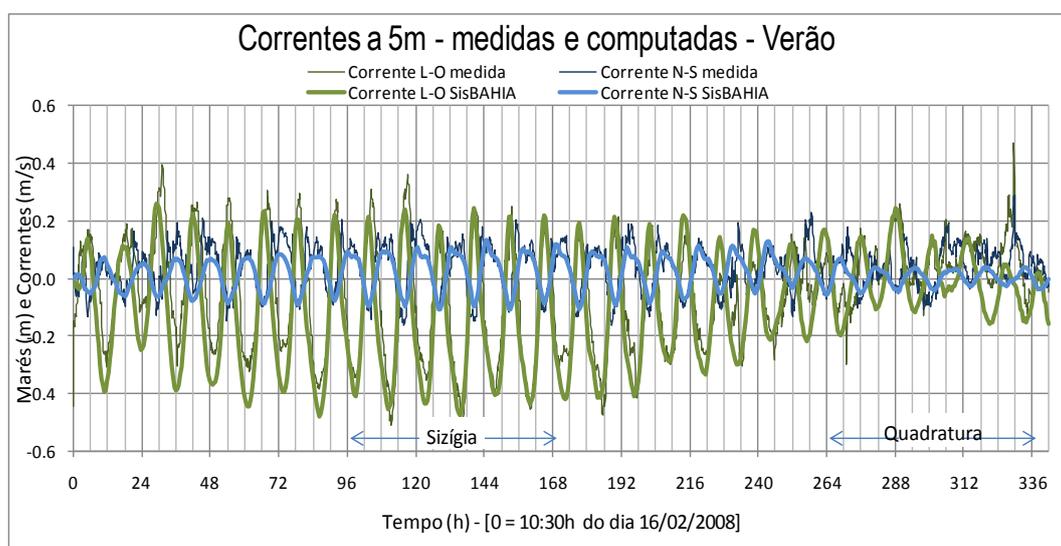


Gráfico 10 – Calibração das correntes L-O e N-S a 5 metros de profundidade para o período de verão.

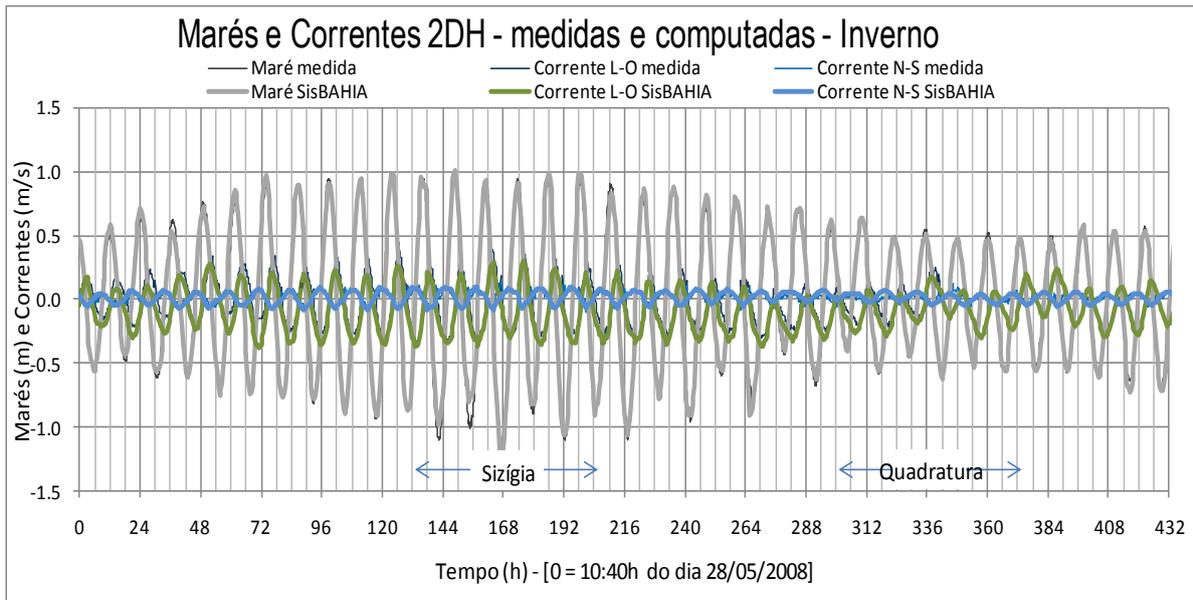


Gráfico 11 - Calibração da elevação da maré e das correntes L-O e N-S na superfície para o período de inverno

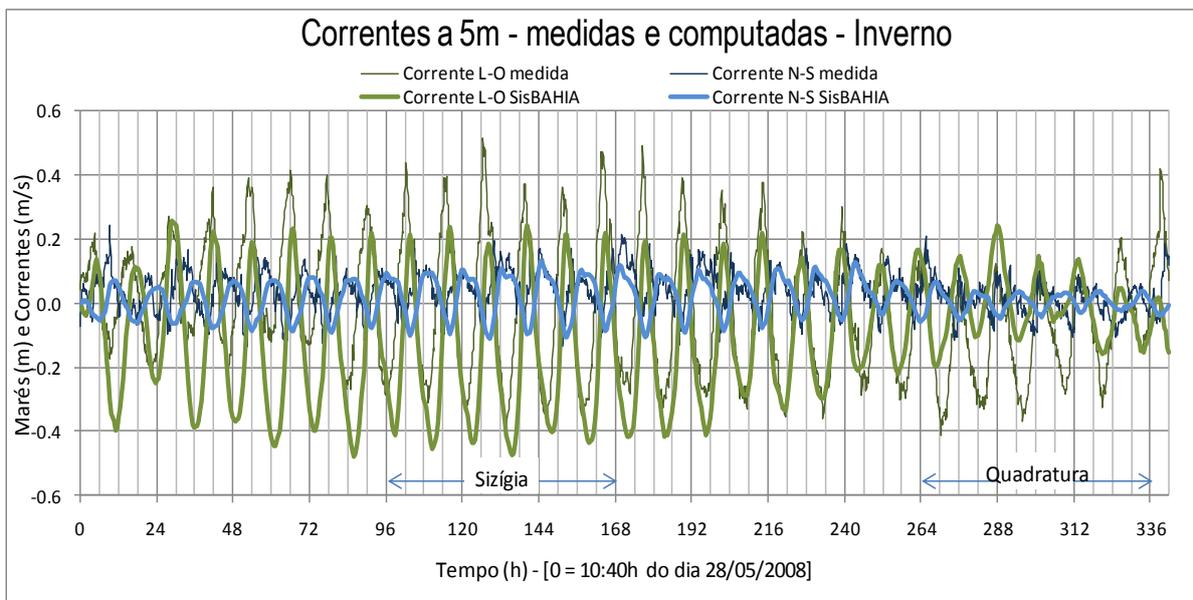


Gráfico 12 - Calibração das correntes L-O e N-S a 5 metros de profundidade para o período de inverno.

Observa-se pelos gráficos acima que os resultados do modelo após as calibrações são muito semelhantes à realidade. Isto pode ser encarado como um processo de validação do modelo hidrodinâmico - FIST 3D, utilizado pelo SisBaHiA[®], pois consegue representar de forma precisa os padrões de circulação hidrodinâmica.

Uma vez calibrado o modelo, pode-se agora mostrar os resultados obtidos para todo o domínio da Baía de Todos os Santos e cercanias. Os resultados seguintes representam a circulação hidrodinâmica promediada na coluna d'água (2DH) para os períodos de verão e inverno.

Tanto o período de sizígia como o de quadratura foram analisados. No entanto, como o de sizígia é o mais importante na análise da pluma do ESRV, pois as correntes hidrodinâmicas possuem magnitudes maiores podendo assim levar a pluma a distâncias mais longínquas, para o verão e inverno apenas este período será aqui apresentado.

3.2.6.1. Verão

O período de modelagem de verão foi do dia 16/02/2008 às 10:30h até o dia 01/03/2008 16:30h. Os instantes analisados durante o período de modelagem hidrodinâmica encontram-se plotados no gráfico abaixo.

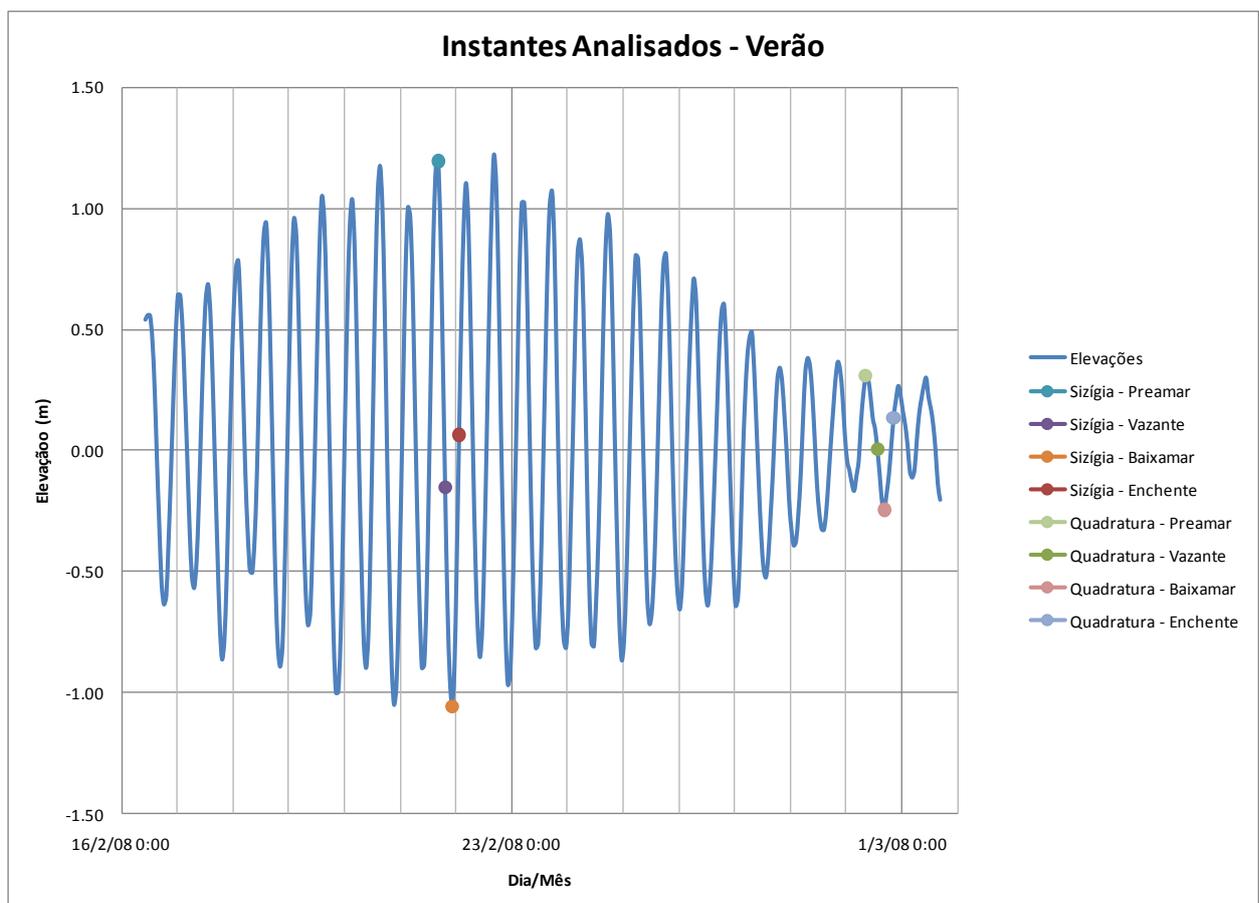


Gráfico 13 – Plotagem dos instantes específicos analisados de sizígia e quadratura para o período de verão.

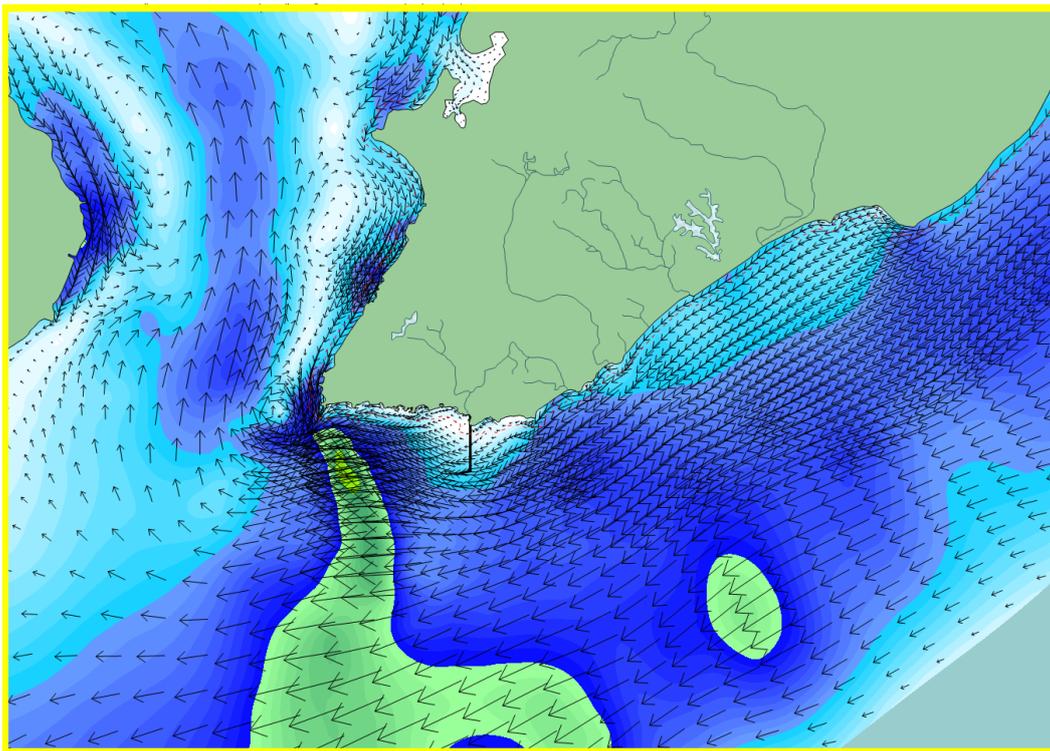
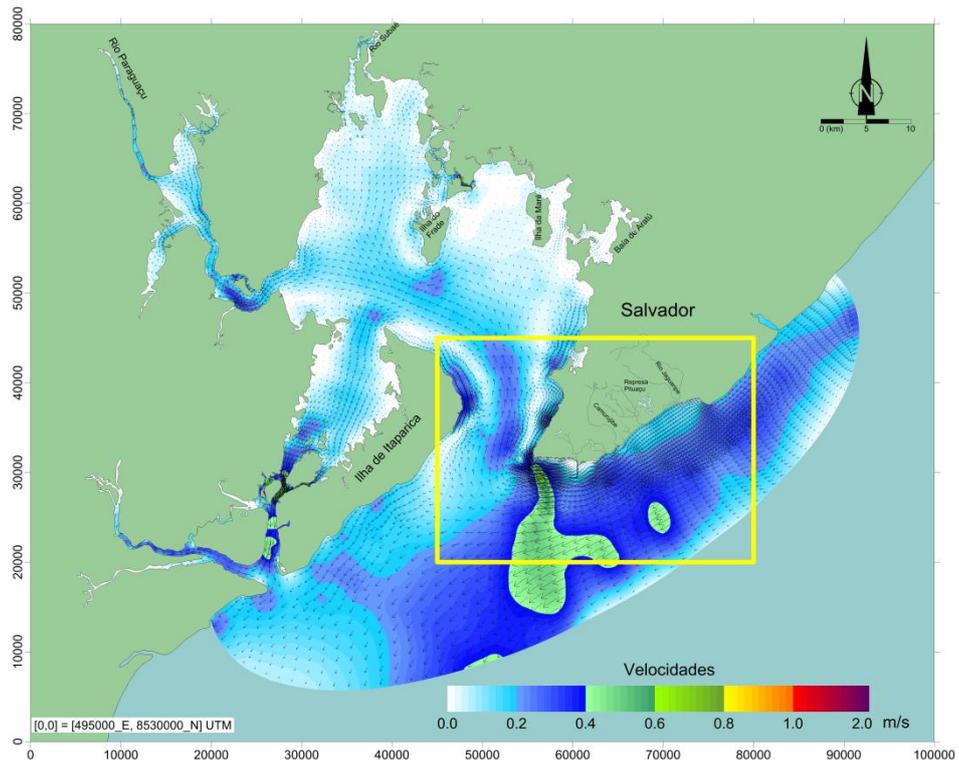


Figura 15 – Campo de velocidades médio na coluna d’água para a BTS e cercanias e detalhe da região de interesse, no dia 21/02/2008 às 16:30h, durante a preamar de sizígia para o período de verão.

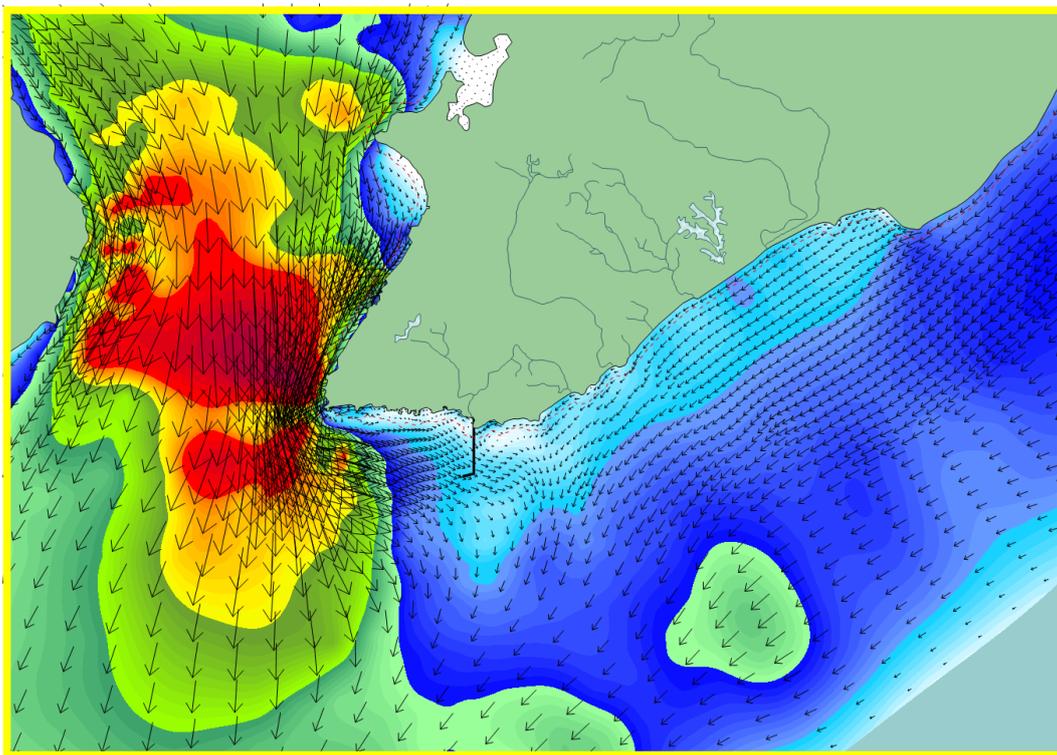
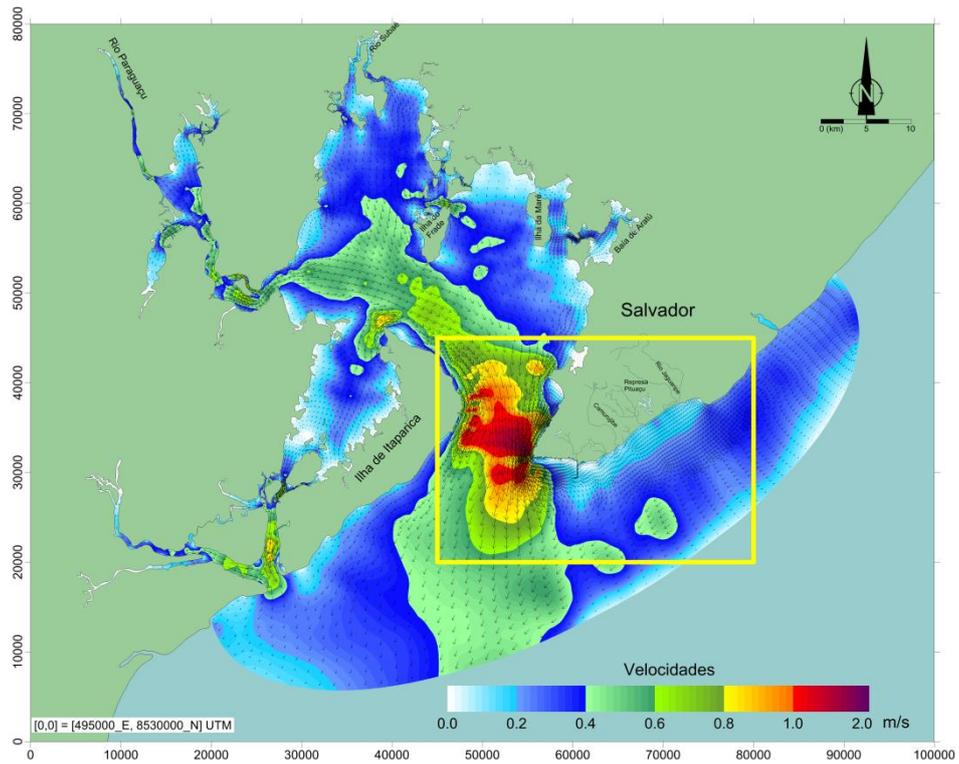


Figura 16 - Campo de velocidades médio na coluna d'água para a BTS e cercanias e detalhe da região de interesse, no dia 21/02/2008 às 19:30h, durante a meia maré vazante de sizígia para o período de verão.

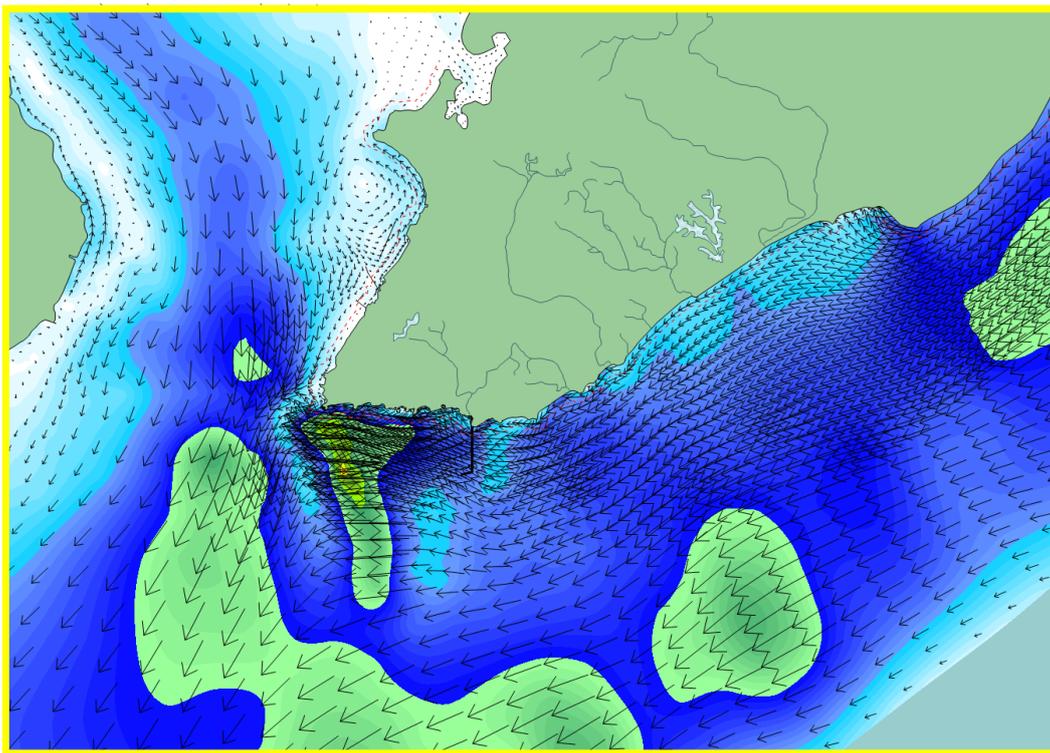
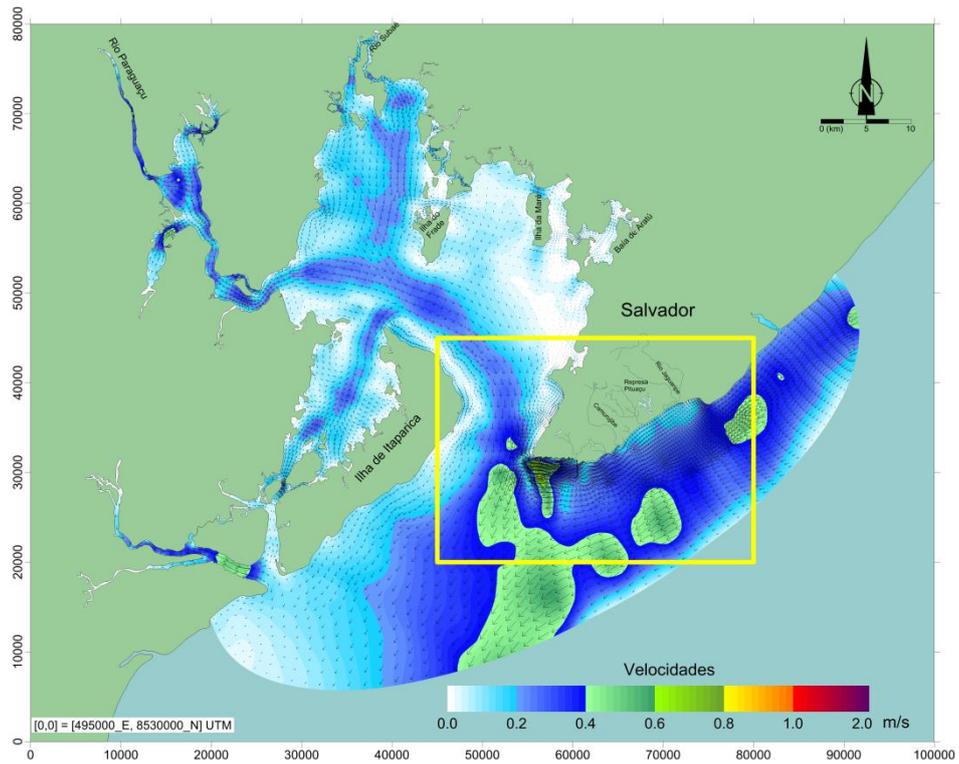


Figura 17 - Campo de velocidades médio na coluna d'água para a BTS e cercanias e detalhe da região de interesse, no dia 21/02/2008 às 22:30h, durante a baixamar de sizígia para o período de verão.

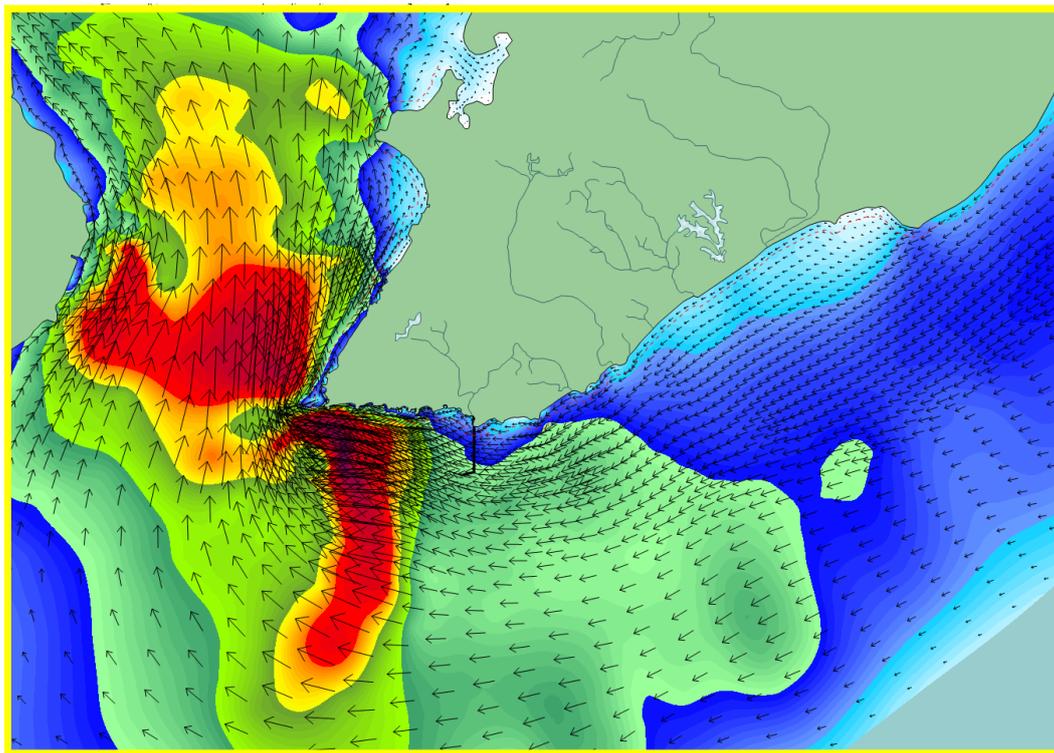
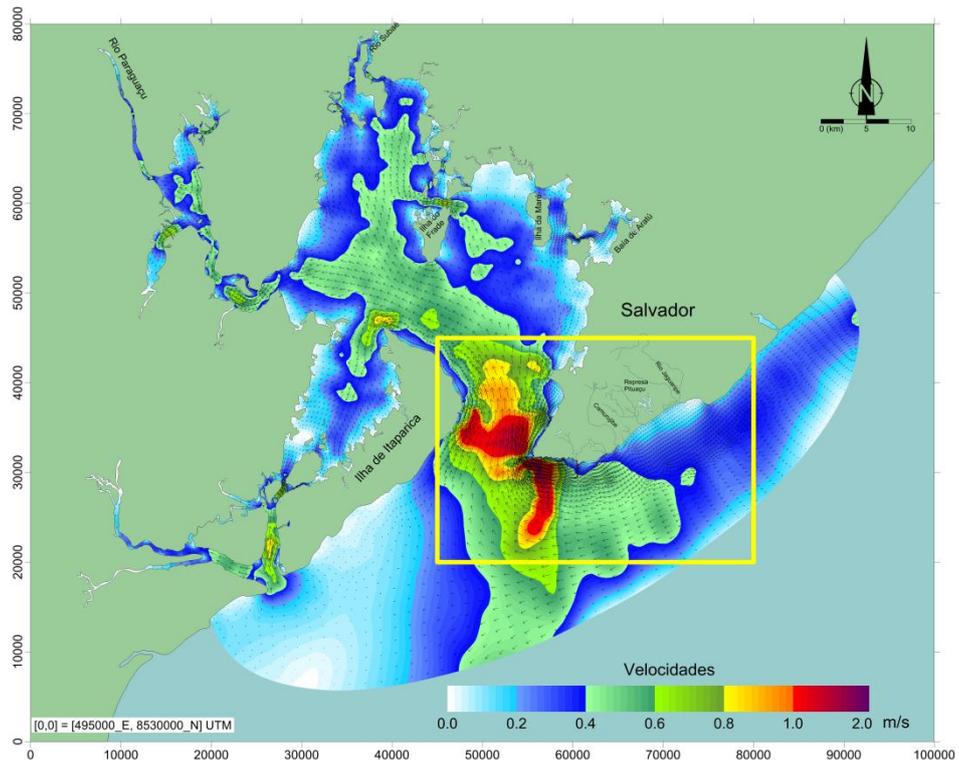


Figura 18 - Campo de velocidades médio na coluna d'água para a BTS e cercanias e detalhe da região de interesse, no dia 22/02/2008 às 01:30h, durante a meia maré enchente de sizígia para o período de verão.

3.2.6.2. Inverno

O período de modelagem de inverno foi do dia 28/05/2008 às 10:40h até o dia 16/06/2008 13:40h. Os instantes analisados encontram-se plotados no gráfico abaixo.

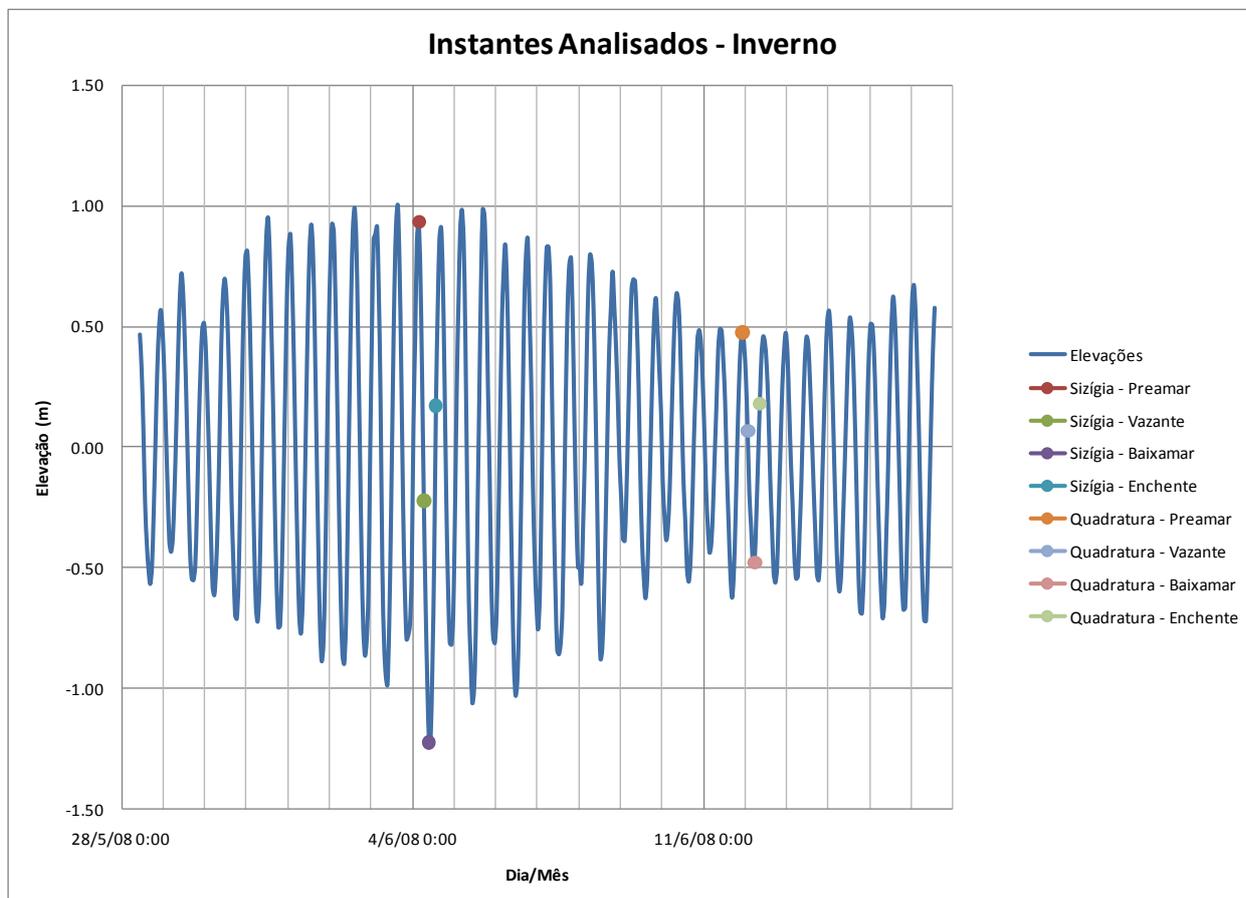


Gráfico 14 - Plotagem dos instantes específicos analisados de sизigia e quadratura para o período de inverno.

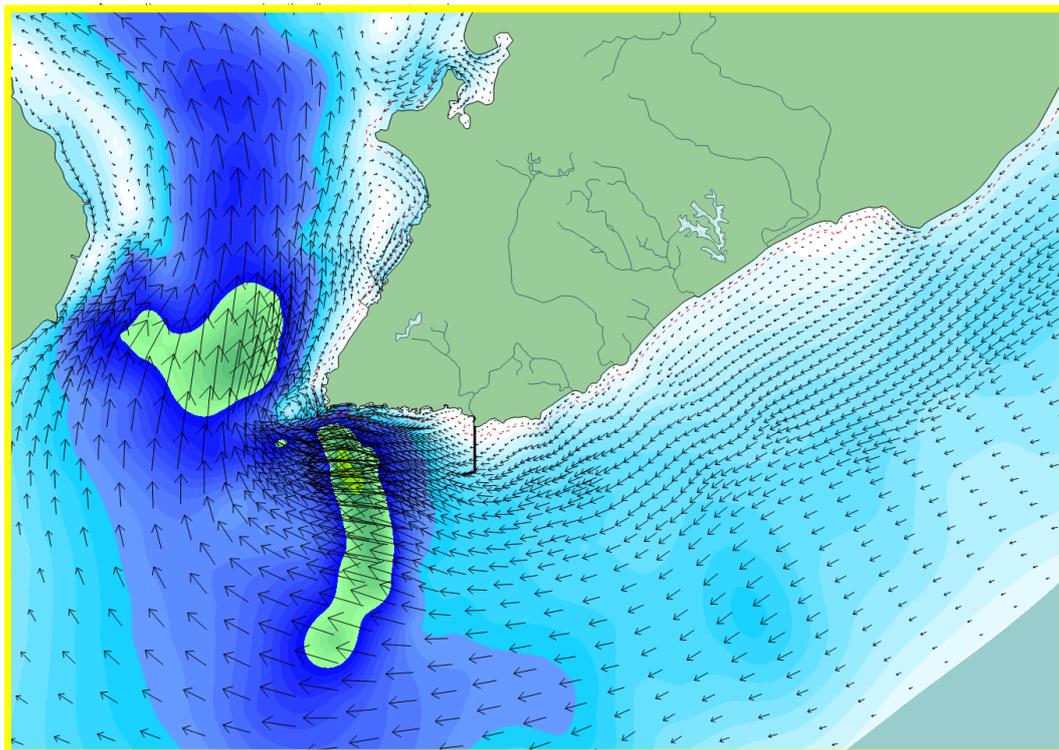
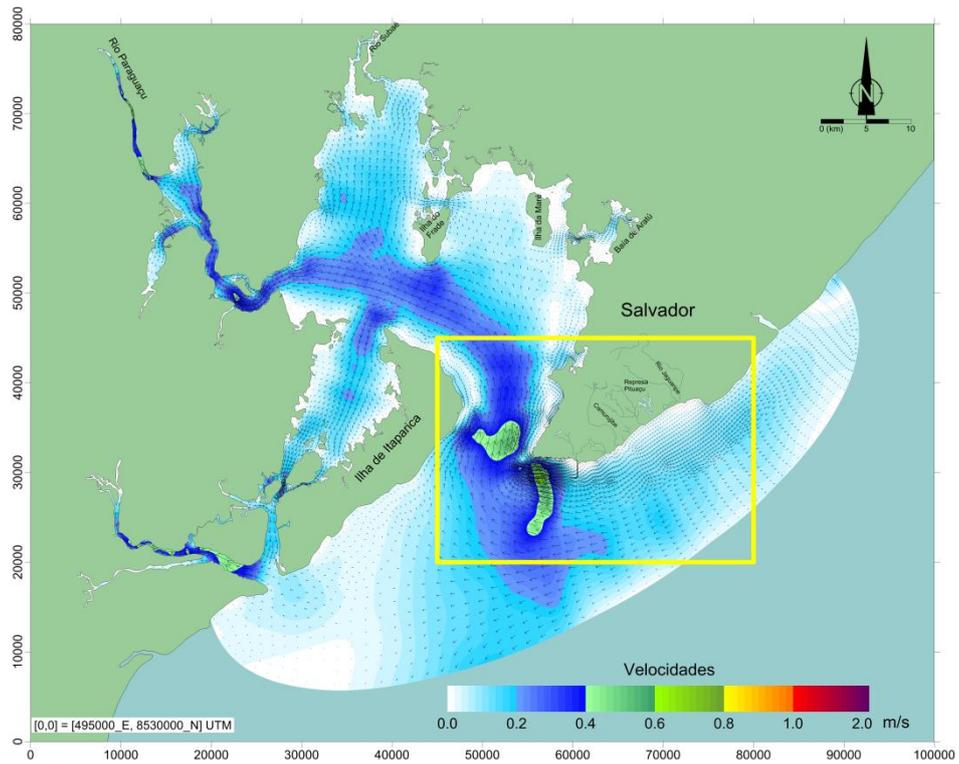


Figura 19 - Campo de velocidades médio na coluna d'água para a BTS e cercanias e detalhe da região de interesse, no dia 04/06/2008 às 03:40h, durante a preamar de sizígia para o período de inverno.

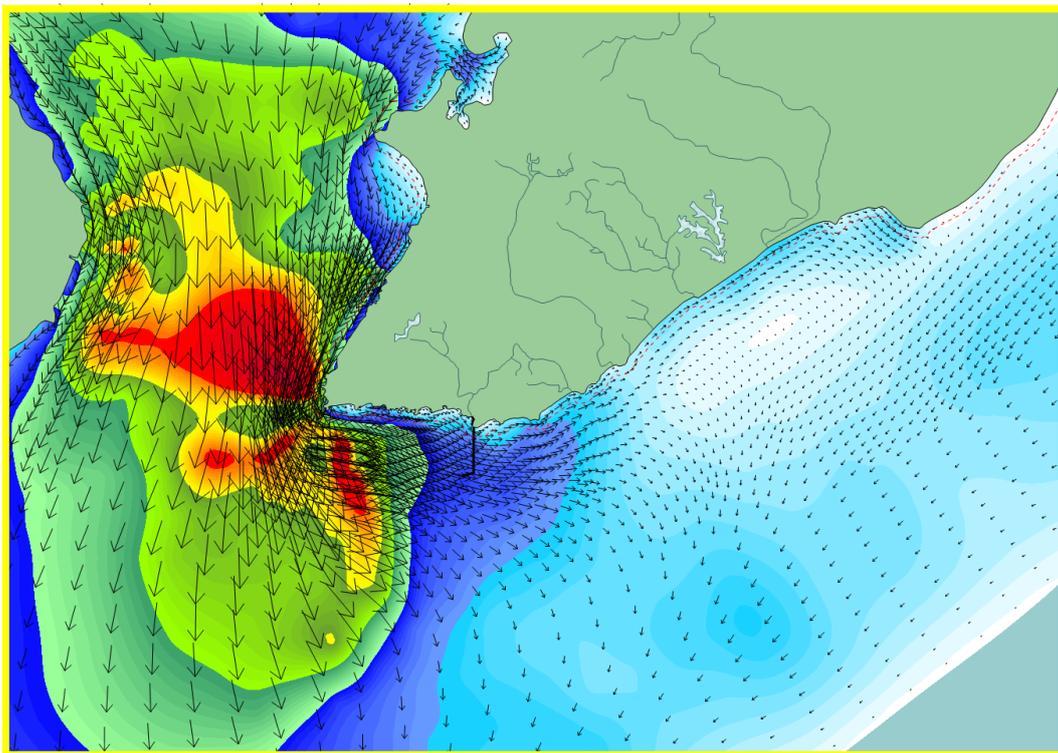
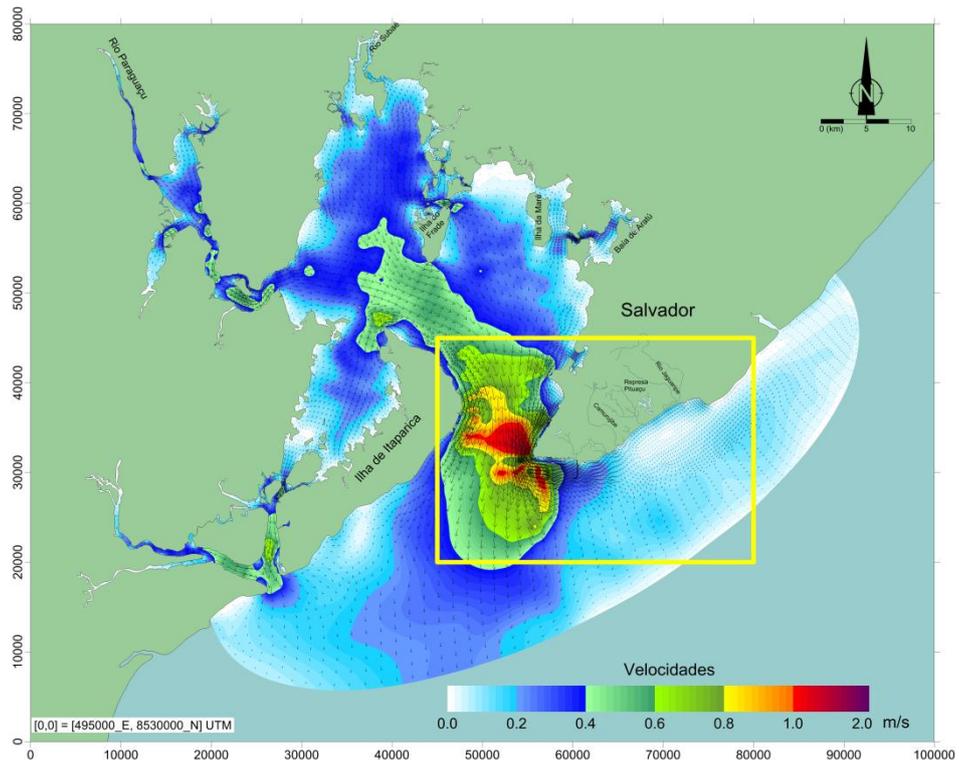


Figura 20 - Campo de velocidades médio na coluna d'água para a BTS e cercanias e detalhe da região de interesse, no dia 04/06/2008 às 06:40h, durante a meia maré vazante de sizígia para o período de inverno.

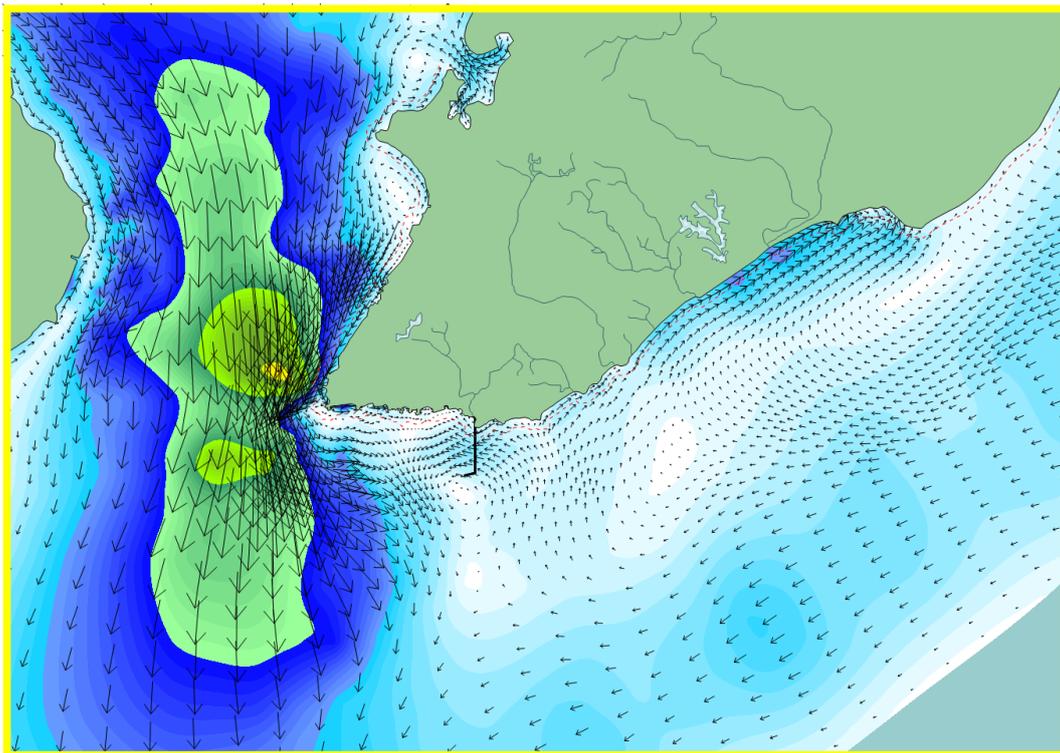
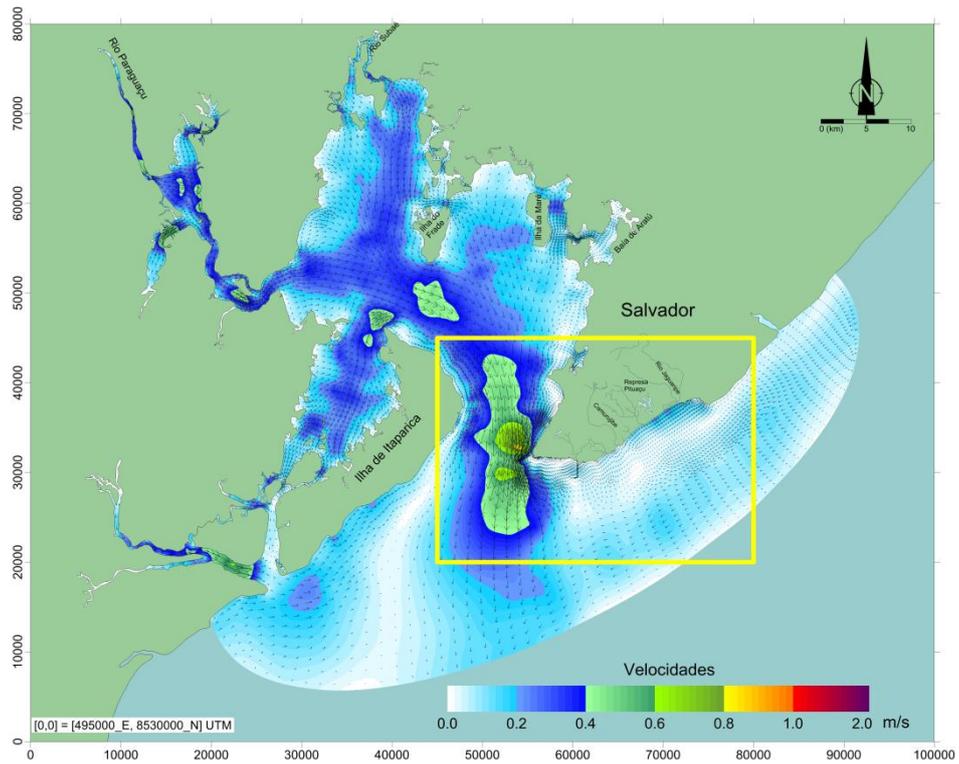


Figura 21 - Campo de velocidades médio na coluna d'água para a BTS e cercanias e detalhe da região de interesse, no dia 04/06/2008 às 09:40h, durante a baixamar de sizígia para o período de inverno.

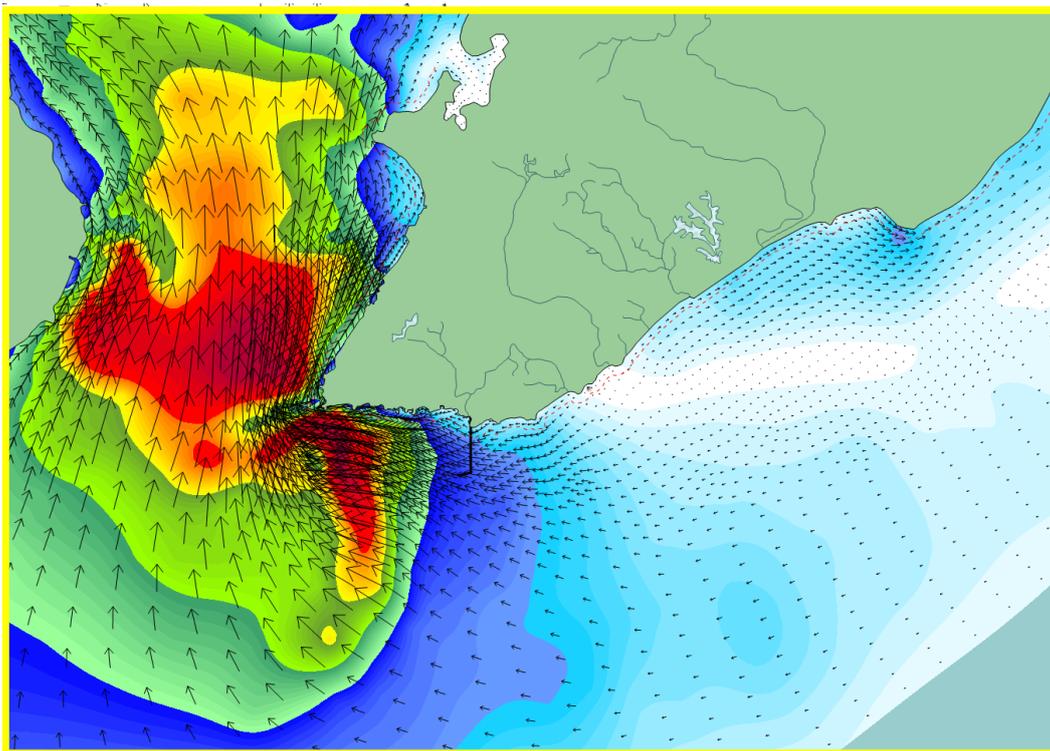
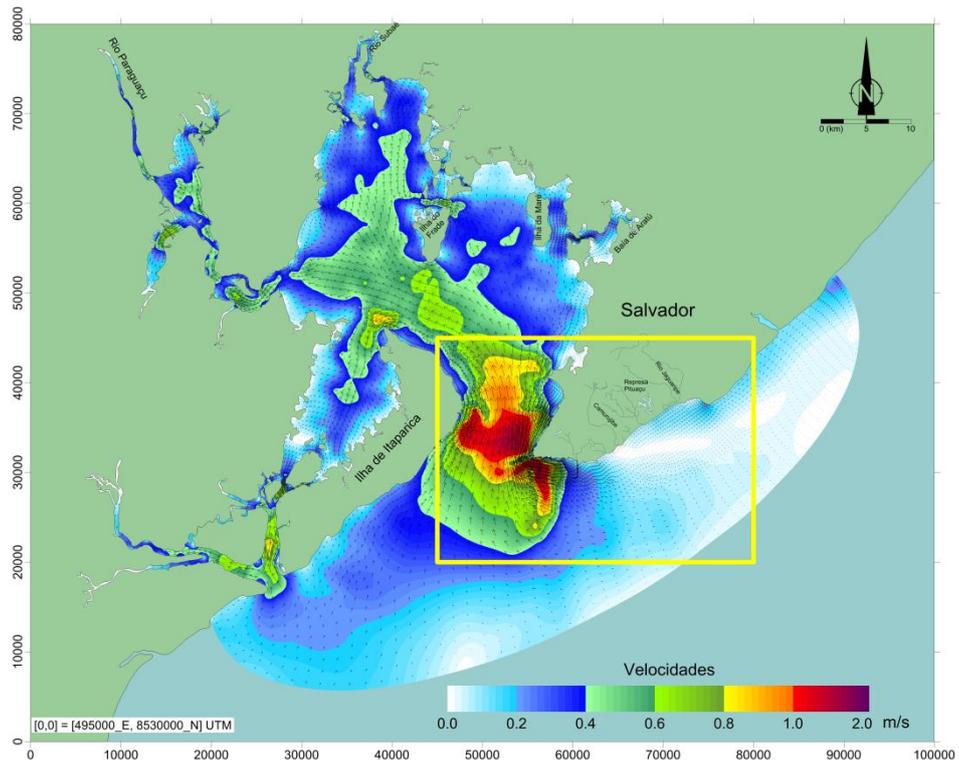


Figura 22 - Campo de velocidades médio na coluna d'água para a BTS e cercanias e detalhe da região de interesse, no dia 04/06/2008 às 13:40h, durante a meia maré enchente de sizígia para o período de inverno.

3.2.6.3. Análise dos resultados do modelo hidrodinâmico

Os resultados do modelo hidrodinâmico demonstram que no lado direito da embocadura da BTS, bem próximo ao ESRV, grandes velocidades se formam. Estas correntes de fortes magnitudes constituem-se em um risco para a balneabilidade das praias da região, pois durante as meias marés de enchente a pluma a deriva pode facilmente vir a tocar a costa.

O motivo da formação destas altas velocidades está na batimetria da região entre o emissário e a embocadura da BTS. Olhando-se o mapa batimétrico com mais detalhe, observa-se a existência de uma grande área de baixas profundidades (Figura 23).

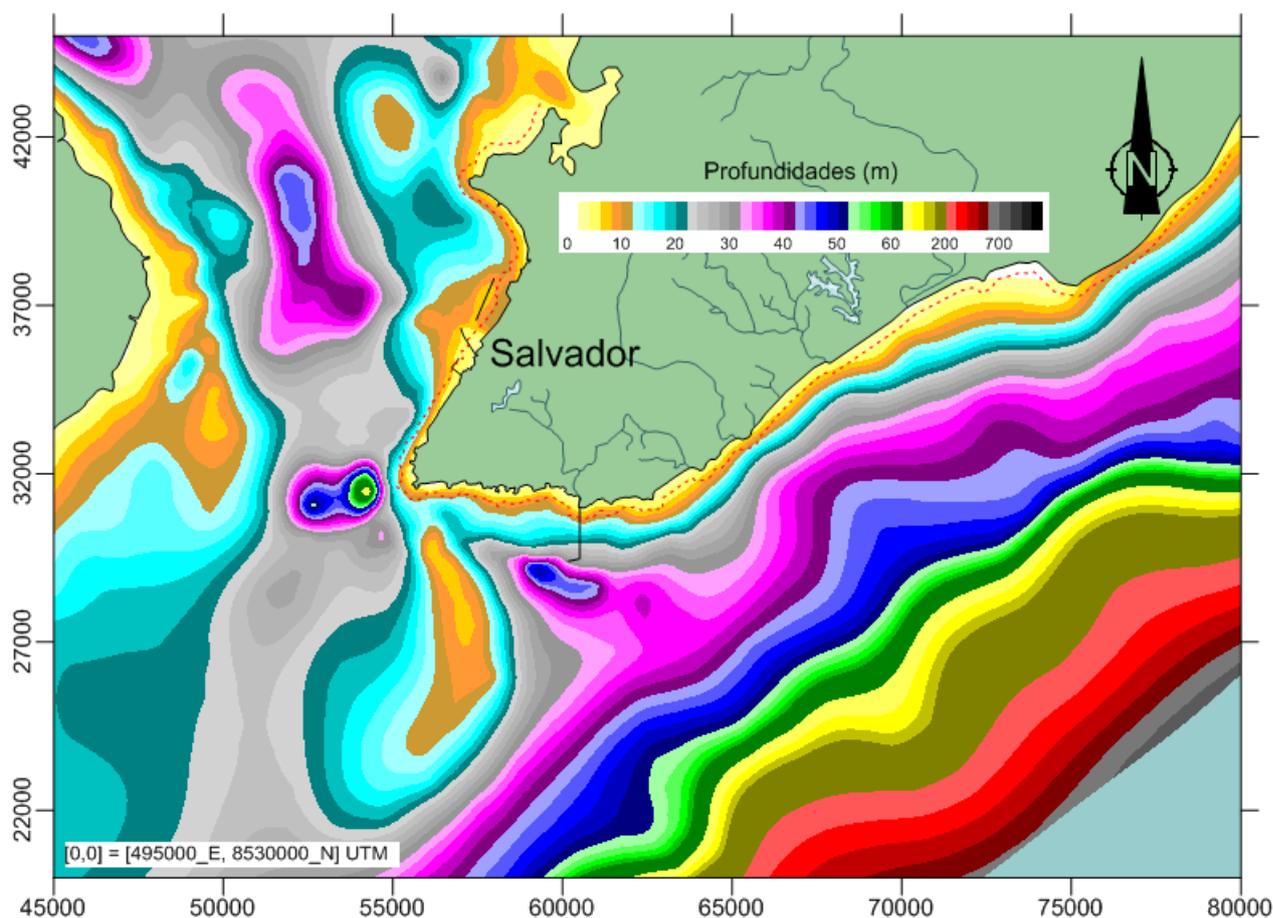


Figura 23 – Batimetria com foco na região próxima ao ESRV.

Essa região rasa recebe o nome de Banco de Areia de Santo Antônio. Sua formação muito provavelmente se deve à própria circulação hidrodinâmica local e portanto a dragagem dessa área não se constituiria em uma solução para a melhoria do ESRV.

3.2.7. Modelagem Lagrangeana

No processo de mistura inicial do esgoto com a água ambiente, há duas regiões com características cujas escalas espaciais e temporais são marcadamente distintas. A primeira

ocorre no campo próximo da linha difusora do emissário, na chamada zona de mistura ativa. Esta região é caracterizada por intensa turbulência, onde a circulação hidrodinâmica é extremamente influenciada pelo jato efluente da tubulação difusora, pelas forças de empuxo e pelo escoamento ambiente. Na medida em que se afasta da linha difusora, a pluma ejetada vai se misturando com a água ambiente, até tornar-se neutra. Na segunda região, então chamada de campo afastado ou zona de mistura neutra, a pluma neutra é transportada passivamente pelas correntes oceânicas. É nesta região que se faz necessária a implementação da cinética de decaimento bacteriano, que compreende a inclusão e validação do modelo de radiação solar. (Feitosa, 2007)

Portanto, deve-se analisar a tubulação difusora olhando para esses dois campos distintos. No campo próximo, deve-se otimizar a diluição inicial do efluente nas águas marinhas, observando os fatores que influenciam neste processo, como as correntes hidrodinâmicas e a profundidade da tubulação. Já no campo afastado, a distância da tubulação difusora à costa será analisada, permitindo um maior ou menor período de tempo para a atuação da radiação solar.

O processo de modelagem verificou que os piores resultados se deram durante o cenário de verão. Portanto, as análises gráficas e as figuras apresentadas adiante correspondem a esse período.

3.2.7.1. Campo Próximo

De acordo com Tian *et al.* (2004), a diluição alcançada no campo próximo depende da intensidade das correntes oceânicas atuantes, da relação entre o espaçamento entre orifícios da tubulação difusora e a profundidade de lançamento do efluente. (Feitosa, 2007)

De acordo com Roberts (1979), a diluição inicial do efluente sob a ação de correntes perpendiculares à tubulação difusora é maior do que quando essas correntes atuam paralelamente. Este fato é facilmente compreendido quando se imagina que com correntes paralelas, os jatos se sobrepõem uns aos outros a uma distância menor do que quando as correntes estão perpendiculares, fazendo com que haja um menor tempo de contato entre o efluente e a “água limpa”.

Desta forma, o primeiro aspecto analisado foi a angulação da tubulação difusora do ESRV.

A. Angulação da Tubulação Difusora

Atualmente este ângulo é de N257° (103° em relação ao eixo do emissário submarino).

A partir do modelo hidrodinâmico do SisBaHiA[®], as direções das correntes durante os períodos modelados nas profundidades de zero, cinco e oito metros foram analisadas. Observou-se que não há uma grande variação dessas direções ao longo da coluna d'água e, portanto, o critério utilizado para decidir o ângulo ótimo da tubulação difusora foi a direção predominante das correntes em superfície.

Essas direções foram estudadas para todos os pontos de possíveis soluções propostas. No caso do estudo dos Cenários 1 (A_0) e 2 (P_0), o seguinte gráfico compara as duas situações.

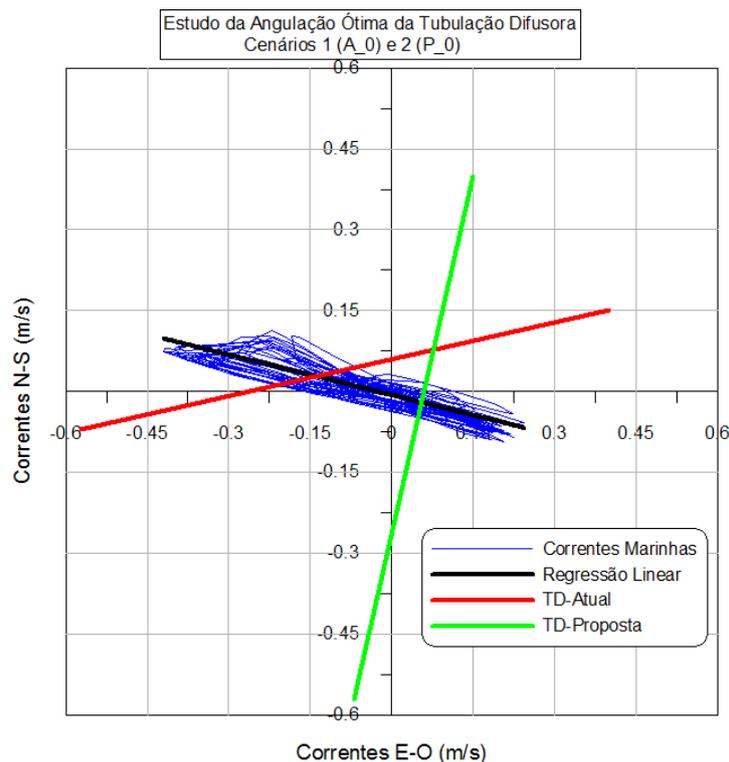


Gráfico 15 – Estudo da angulação ideal da tubulação difusora para as correntes de superfície durante o período de verão. Note que as linhas que representam a tubulação difusora, tanto no caso atual (Cenário 1 (A_0)) como no ideal (Cenário 2 (P_0)), estão fora de escala e do seu posicionamento real.

Neste caso, a regressão linear das direções das correntes apresenta um ângulo de N283°. Desta forma, a tubulação difusora deveria ter um ângulo de N193° (283 - 90) ao invés de N257° que possui atualmente. Portanto, para o verão, esta tubulação deveria ser rotacionada de 64° no sentido anti-horário em relação à sua posição atual.

É importante ressaltar que a regressão linear confere um grau de acerto a si mesma denominada Coeficiente de Correlação (R^2). Para o caso da Gráfico 15, esse coeficiente teve um valor de 0,816, indicando que a regressão feita é uma boa representação das correntes locais – sendo que 1 indicaria uma representatividade perfeita.

No entanto, conforme vai se afastando da costa, as direções das velocidades hidrodinâmicas apresentam uma variabilidade maior, diminuindo a representatividade da regressão linear. O pior caso foi para o Cenário 7 (P_2500), ou seja, como a tubulação difusora a 4.500m da costa, quando o coeficiente obteve um valor de 0,525.

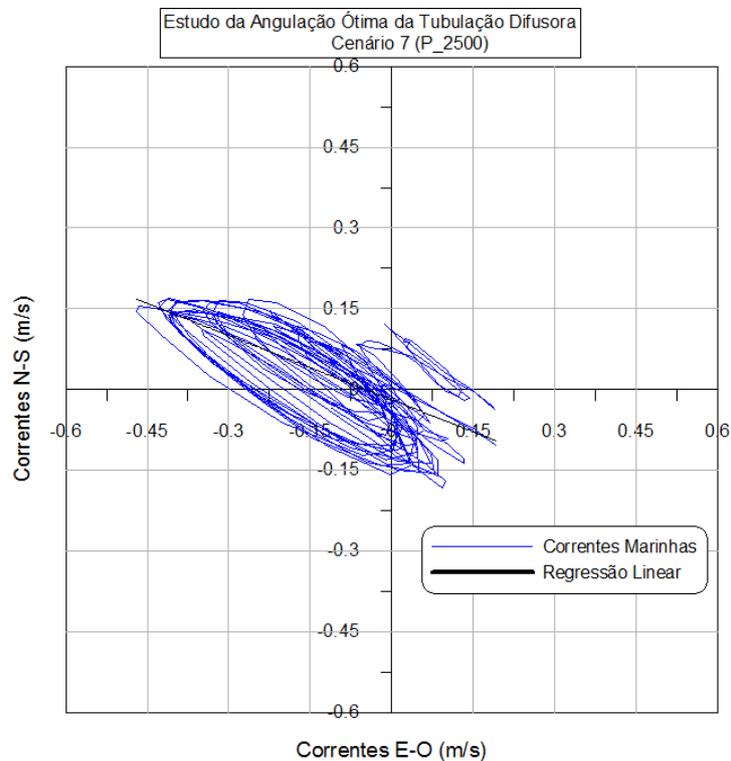


Gráfico 16 - Estudo da angulação ideal da tubulação difusora para as correntes de superfície a 4.500 metros da costa - Cenário 7 (P_2500), durante o período de verão.

Apesar da regressão linear neste caso não representar bem as correntes marinhas, ainda assim foi utilizada no cálculo do ângulo ótimo da tubulação difusora.

A análise para o inverno também foi feita de forma que o ângulo final foi a média dos ângulos ótimos dos dois períodos aproximado para o inteiro mais próximo. A Tabela 10 resume os resultados.

Tabela 10 – Resumo do estudo de otimização do ângulo da tubulação difusora.

Cenário	Ângulo Azimute da TD (°)
1 (A_0)	257
2 (P_0)	193
3 (P_700)	196
4 (P_1000)	196
5 (P_1500)	200
6 (P_2000)	202
7 (P_2500)	204

A importância deste estudo pode ser observada no Gráfico 17, que mostra a comparação da predominância de ângulos próximos a 90° da ação das correntes em relação à tubulação difusora otimizada para os Cenários 1 (A_0) e 2 (P_0) durante o verão.

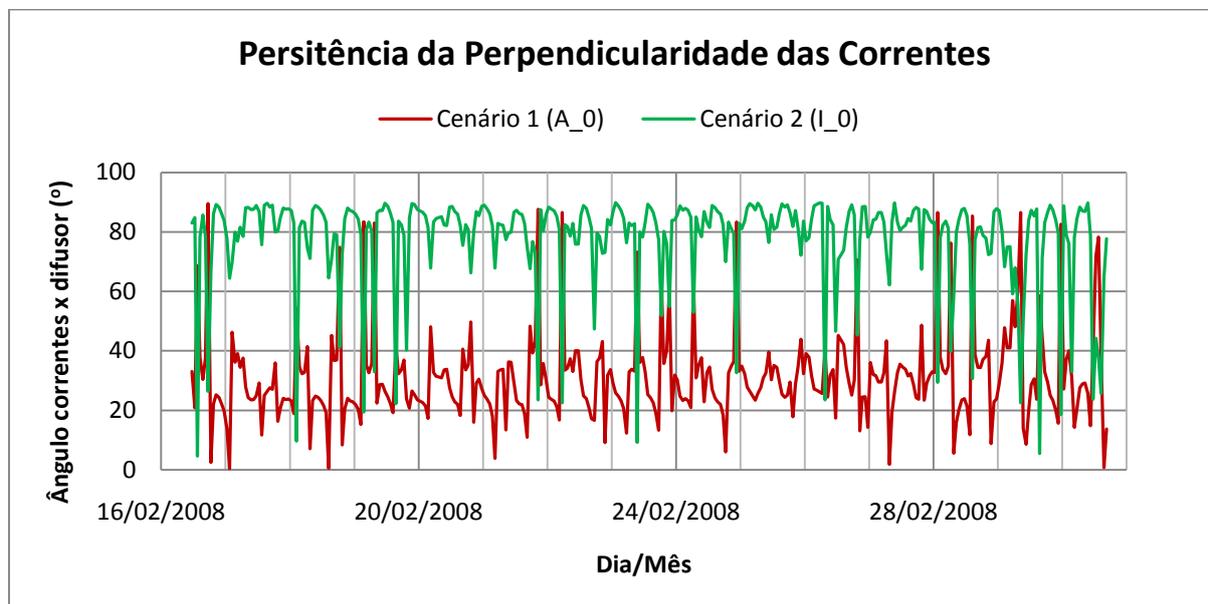


Gráfico 17 – Ângulo de ação das correntes em relação à tubulação difusora para os Cenários 1 (A_0) e 2 (P_0) durante o verão. 0° corresponde à ação paralela e 90° corresponde à ação perpendicular.

Dado que a diluição inicial é maior quando as correntes estão perpendiculares à tubulação difusora, fica claro que com a tubulação otimizada, esta diluição será maior.

B. Diluição Inicial

Uma vez estabelecidos os ângulos da tubulação difusora, a modelagem lagrangeana pode ser feita. É importante lembrar que no campo próximo, o grande agente redutor da concentração de Coliformes será a diluição ocorrida no contato turbulento entre efluente e águas marinhas.

O Gráfico 18 mostra os resultados obtidos através do SisBaHiA[®] para a diluição mínima ao final do campo próximo no Cenário 1 (A_0) de verão. A Tabela 11 resume os resultados para as demais situações ainda durante verão. Ao longo do inverno, os valores obtidos foram muito similares e portanto não serão aqui expostos.

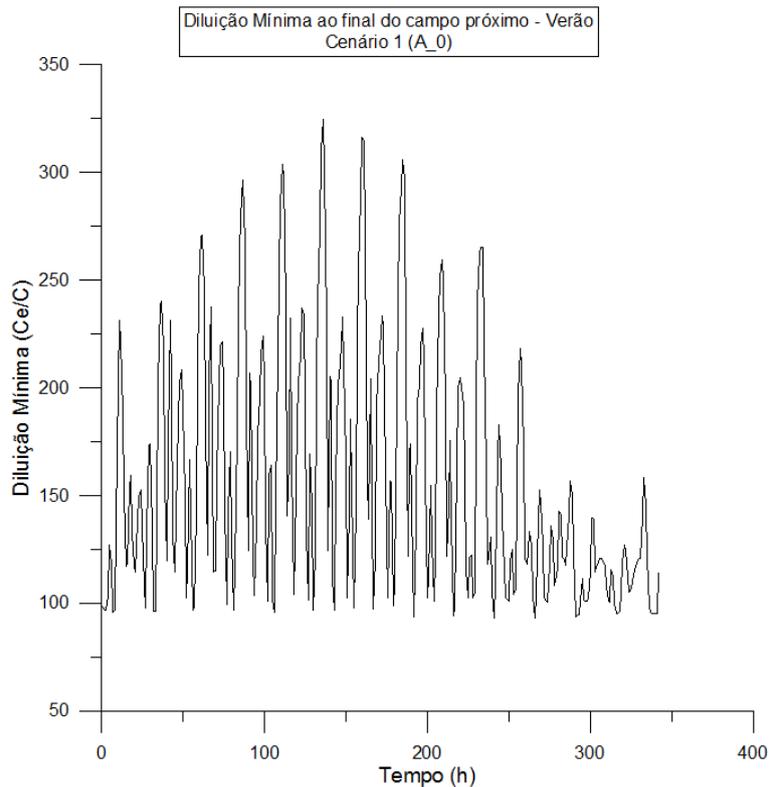


Gráfico 18 – Variação temporal da diluição mínima no fim do campo próximo para a situação do emissário atual no cenário de verão. Ce/C é a razão entre a concentração no emissário (Ce) e a concentração máxima na pluma do emissário no final do campo próximo.

Tabela 11 – Resumo dos resultados obtidos para a diluição mínima no campo próximo para o cenário de verão.

Cenário	Profundidade (m)	Diluição Mínima				Comparação - Média
		Máxima	Mínima	Mediana	Média	
1 (A_0)	27,00	324,61	93,00	139,81	158,47	-
2 (P_0)	27,00	685,36	107,61	189,19	241,55	52,42%
3 (P_700)	42,94	908,92	155,93	256,00	341,64	115,58%
4 (P_1000)	40,99	907,02	150,16	242,33	334,09	110,82%
5 (P_1500)	37,75	809,34	140,56	222,68	310,77	96,10%
6 (P_2000)	35,10	759,45	132,19	210,74	293,43	85,16%
7 (P_2500)	32,88	700,99	125,50	205,26	276,08	74,21%

O primeiro fato a ser observado é que apenas otimizando-se a tubulação difusora em relação ao seu comprimento (através da rotina de Rawn) e sua angulação, a eficiência média de diluição aumenta em 52,42%, garantindo uma diluição mínima mínima de 1:100 ainda dentro do campo próximo, cujo comprimento máximo foi de aproximadamente 500 m ao longo do período simulado (Gráfico 19).

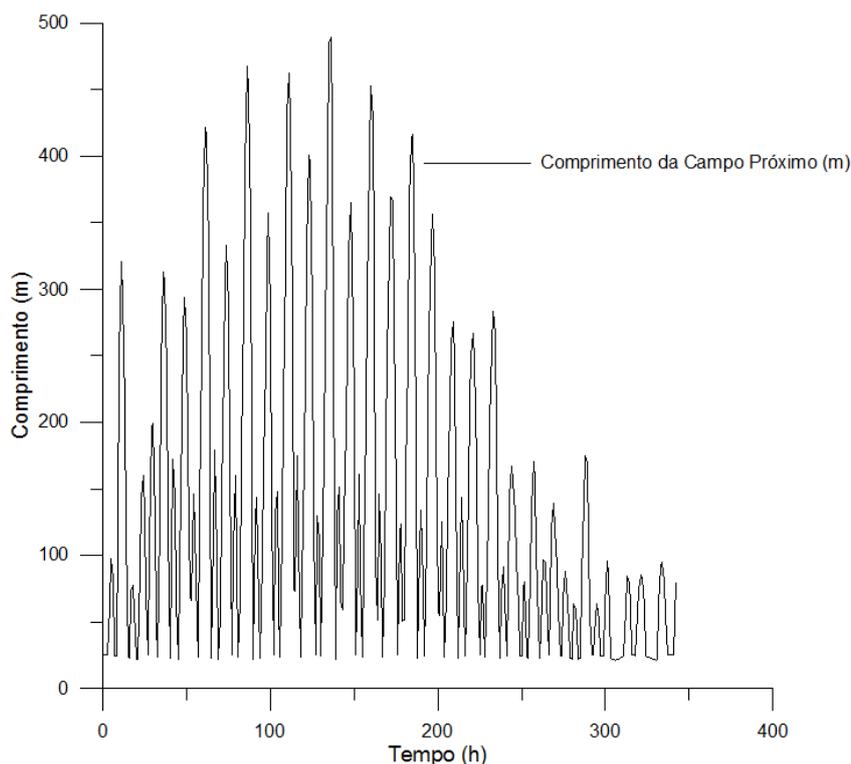


Gráfico 19 - Variação temporal do comprimento do campo próximo para o Cenário 2 (P_0) no período de verão. Garantia de uma diluição mínima mínima de 1:100 dentro de um raio de 500 m centrado no eixo da tubulação difusora.

Verifica-se também a importância da profundidade da tubulação difusora na diluição do efluente. A análise da Tabela 11 justifica a escolha de estender-se em 700m o emissário como uma das possíveis soluções. Na Figura 23 observa-se que existe uma forte depressão na batimetria logo em frente ao emissário atual. A essa profundidade de 42,94 m, a diluição mínima média chega a ter um aumento de 115,58% e, portanto, uma eficiência média de remoção de Coliformes Termotolerantes de 99,71%, ao final do campo próximo.

Um cenário que não será mostrado neste trabalho, mas que também foi estudado, é o de se otimizar a tubulação difusora em relação a sua angulação, mas não o seu número de orifícios e respectivos diâmetros. Para este caso, a diluição mínima média obteve um aumento de 30,96% em relação ao Cenário 1 (A_0). Como este resultado está abaixo do valor encontrado para o Cenário 2 (P_0) – o que já era de se esperar, e não haveria sentido prático em se otimizar a angulação, mas não os difusores da tubulação, este cenário não será mais mencionado.

3.2.7.2. Campo Afastado

Segundo Feitosa (2007), o limite do campo próximo é definido como o ponto onde a diluição passa a não variar significativamente com a distância em relação à tubulação difusora. Neste

ponto há uma súbita diminuição da turbulência devido à influência de um processo de estratificação estável que ocorre ao longo da seção da pluma.

Isto significa que no campo afastado a diluição não é mais o principal agente atuante na diminuição das concentrações bacterianas. Como a salinidade e a temperatura da água pouco variam e a pluma já se encontra bem próxima ou inclusive na superfície, a radiação solar é a principal responsável pelo decaimento bacteriano.

Novamente os resultado de inverno e verão foram muito similares. Portanto, escolheu-se apresentar apenas os gráficos referentes ao período de verão.

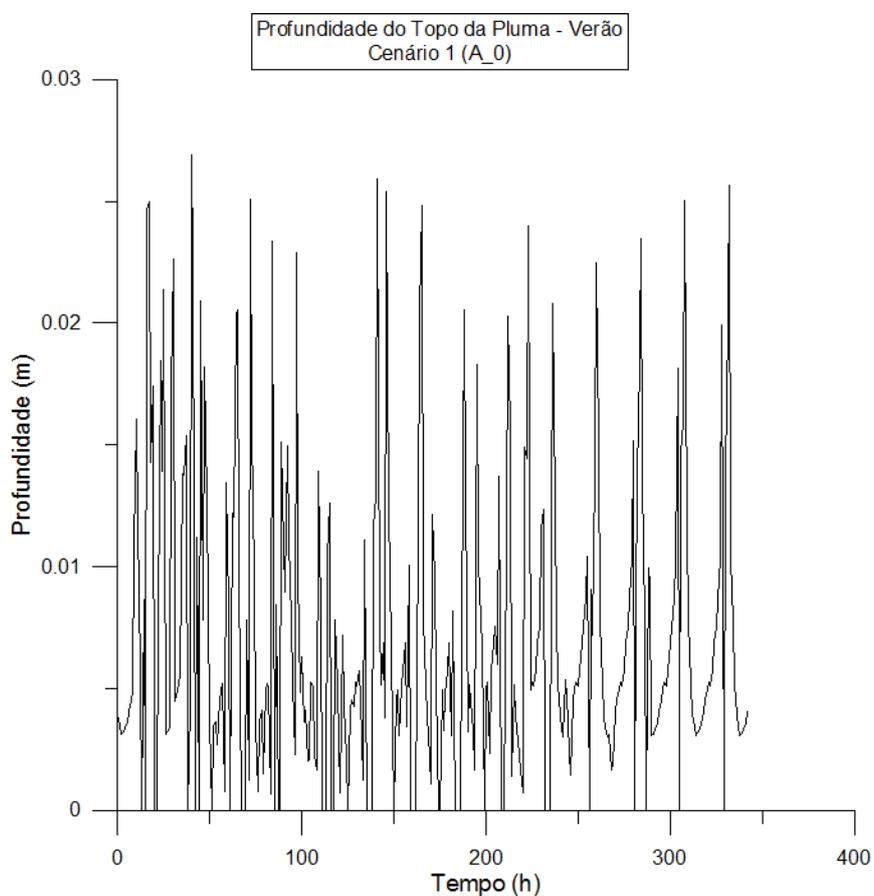


Gráfico 20 – Profundidade do topo da pluma no período de verão para o emissário atual. O eixo x representa o tempo do modelo em horas, onde 0h corresponde ao dia 16/02/2008 às 10:30h.

Pelo Gráfico 20 observa-se que a profundidade do topo da pluma não atinge nem 3 cm de profundidade, ficando bem disponível para a atuação da radiação solar.

O decaimento bacteriano é caracterizado pelo parâmetro T_{90} , que é definido como o intervalo de tempo necessário para que ocorra a mortandade de 90% da população de bactérias remanescente após a diluição e dispersão horizontal. Como neste caso está sendo feita a

utilização de Coliformes Termotolerantes como o indicador de contaminação fecal, o seu gráfico de T_{90} médio ao longo da espessura da pluma é apresentado a seguir.

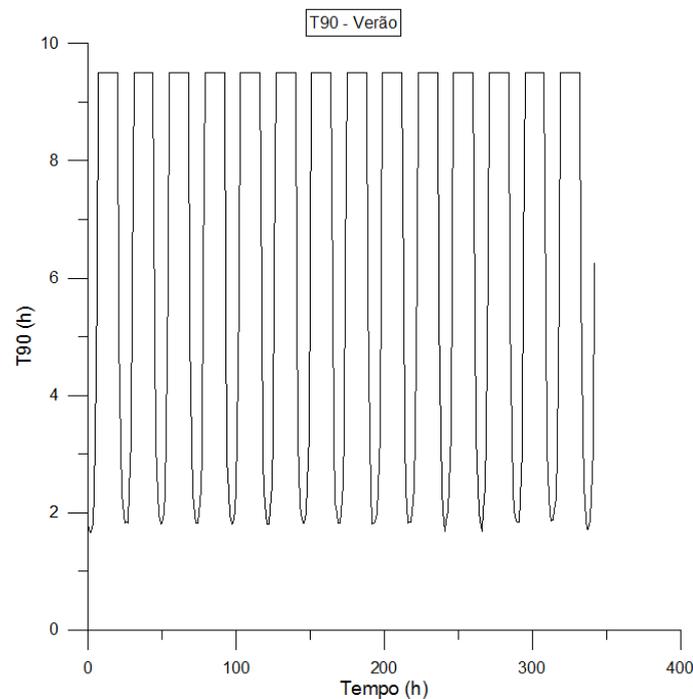


Gráfico 21 – T_{90} médio ao longo da espessura da pluma em horas para o período de verão. O eixo das abscissas representa o tempo do modelo em horas, onde 0h corresponde ao dia 16/02/2008 às 10:30h.

Como a salinidade e a temperatura da água pouco variam, a variação do T_{90} deve-se basicamente à variação da radiação solar incidente e da profundidade do centro da pluma. Nota-se que por volta do meio dia ocorrem os menores valores de T_{90} , portanto a taxa de decaimento bacteriano é mais alta. Durante as noites, devido à inexistência de radiação solar, o T_{90} é longo e o decaimento bacteriano é muito mais lento. A escolha do valor de T_{90} limite igual a 9,5 horas foi feita nos projetos desenvolvidos em 2008. Neste trabalho, decidiu-se aplicar o mesmo valor.

3.2.7.2.1. Verificação dos critérios de balneabilidade das praias

Do Capítulo 2, foi visto que para as praias atenderem aos critérios de balneabilidade, a concentração de Coliformes Termotolerantes não deve ultrapassar 1.000 NMP/100ml em mais de 80% do tempo.

Através do SisBaHiA[®] é possível construir mapas de isolinhas de probabilidade, permitindo que este critério seja avaliado. A figura a seguir ilustra novamente o Cenário 1 (A_0) durante o período de verão simulado.

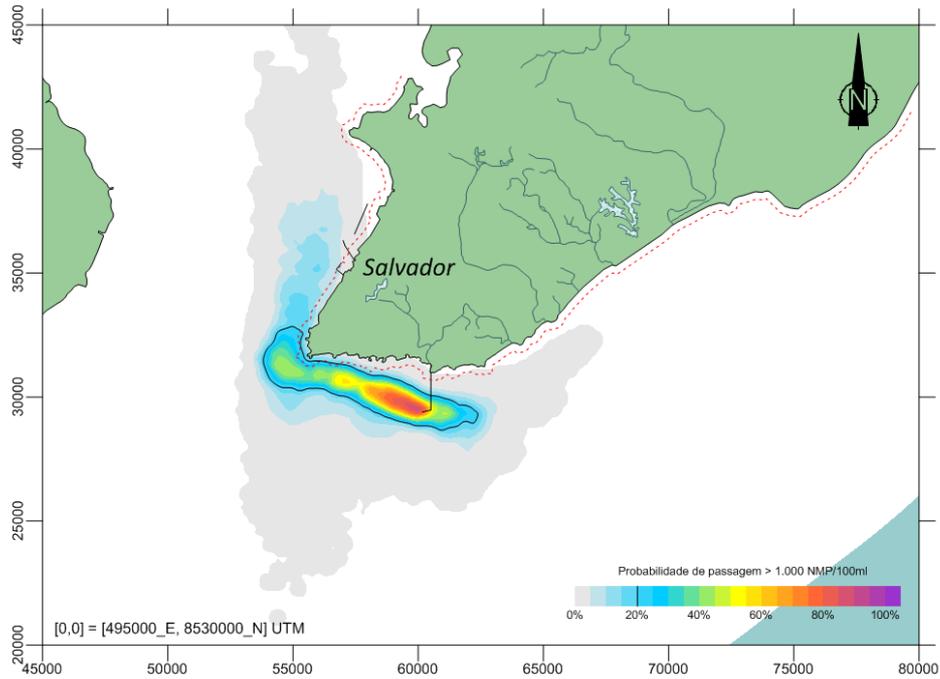


Figura 24 – Mapa de isolinhas de probabilidade de permanência de colimetria no Cenário 1 (A_0) com valor acima de 1.000 NMP/100ml para o período de verão.

A Figura 24 mostra que uma certa área da região costeira de Salvador não atende aos padrões de balneabilidade, pois está dentro da isolinha de 20%. No entanto, mais significativo do que isto é quando observamos a pluma de colimetria durante alguns períodos de sizígia.

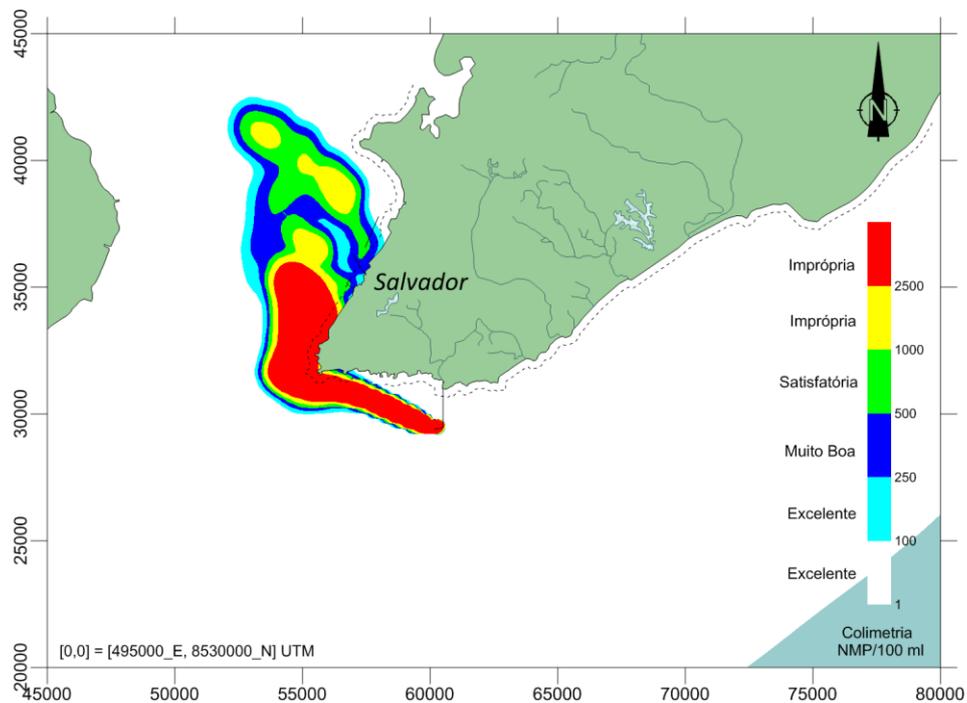


Figura 25 – Pluma de concentração de coliformes termotolerantes para o Cenário 1 (A_0) no dia 22/02/2008 às 01:30h, durante a meia maré enchente de sizígia para o período de verão.

A Figura 25 ilustra bem o que acontece freqüentemente durante as meias marés de enchente nos períodos de sizígia. Uma extensa região costeira de Salvador fica imprópria ao uso de contato primário devido às concentrações acima de 2.500 NMP/100ml de coliformes, estabelecidos pela Resolução CONAMA 274/2000.

Portanto, para analisar este outro critério, um novo mapa de isolinhas de probabilidade deve ser feito, mas agora com uma freqüência de passagem de concentrações maiores do que 2.500 NMP/100ml. A Figura 26 ilustra o período de verão para a situação atual.

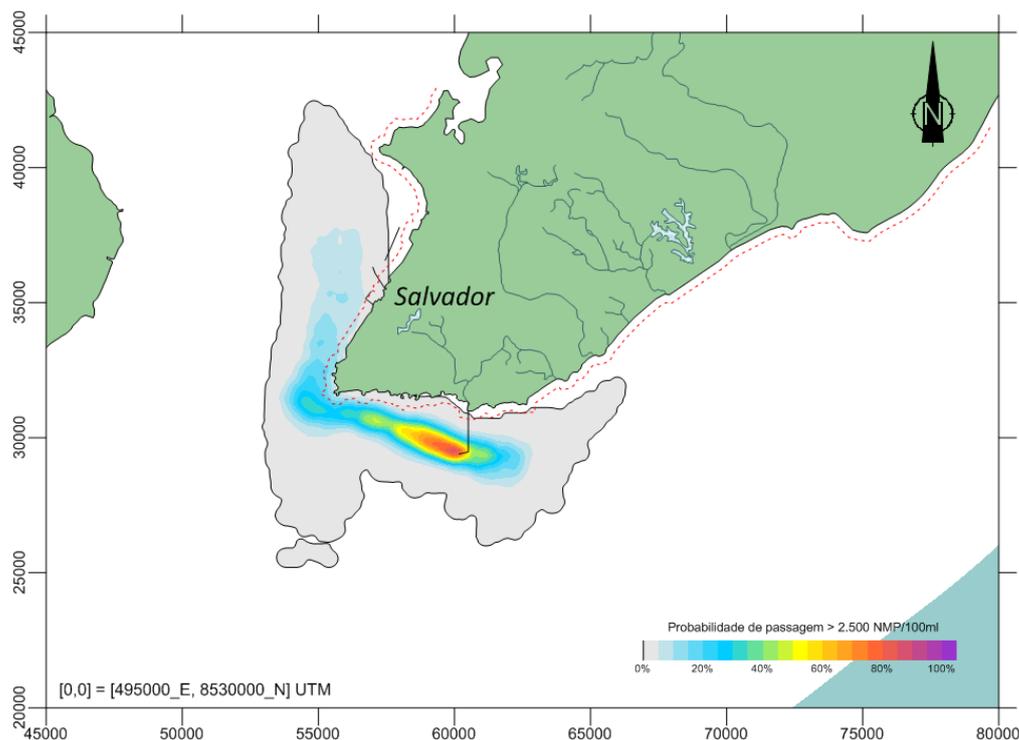


Figura 26 – Mapa de isolinhas de probabilidade de permanência de colimetria no ESRV com valor acima de 2.500 NMP/100ml para o Cenário 1 (A_0) durante o verão.

A figura acima permite ver que o padrão de balneabilidade é freqüentemente violado - na ordem de 10 a 20% do tempo em algumas áreas.

Observando a Tabela 11, a primeira intuição seria propôr o avanço do ESRV em 700 metros, pois nesta posição a diluição mínima média é superior a todas as outras soluções analisadas. No entanto, a Figura 27 mostra que esta solução não é suficiente.

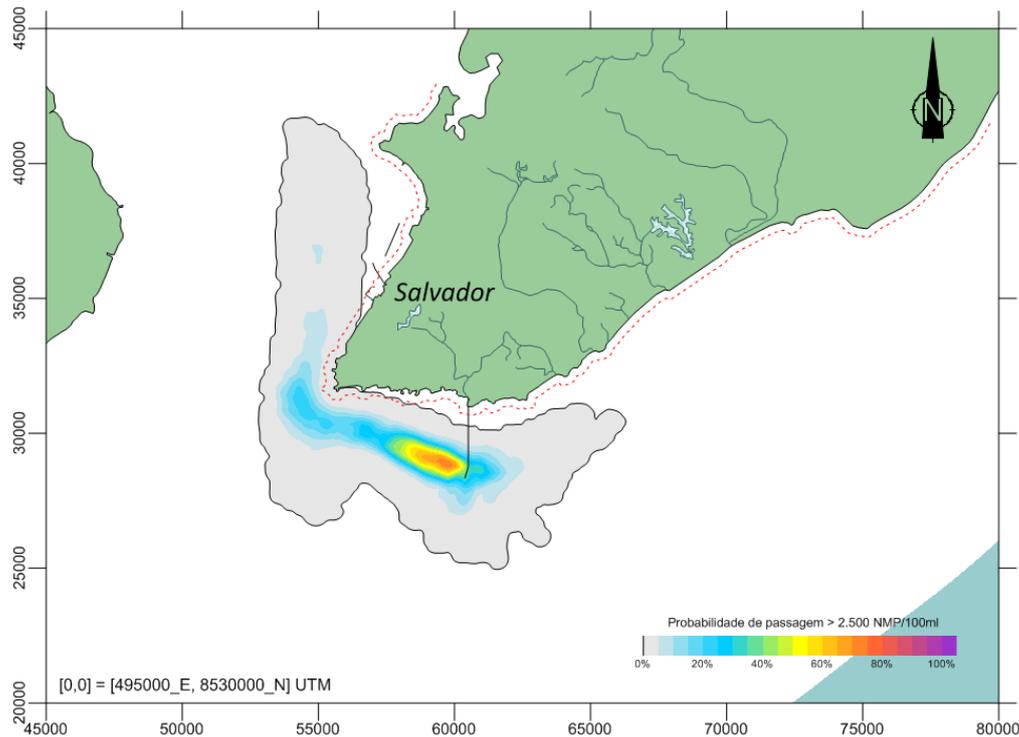


Figura 27 – Mapa de isolinhas de probabilidade de permanência de colimetria no ESRV com valor acima de 2.500 NMP/100ml para o Cenário 3 (P_700) de verão.

A diferença entre os Cenários 1 (A_0) e 3 (P_700) é bem pequena, porque a ordem de grandeza da concentração colimétrica é muito elevada ($3,0 \times 10^7$). Sendo assim, apesar de se estar dobrando a diluição inicial, as concentrações próximas à tubulação difusora no campo afastado continuam sendo muito grandes. Como exemplo, se utilizarmos os valores de diluição mínima média de cada uma destas situações, para o emissário atual teremos uma concentração de $1,89 \times 10^5$ NMP/100ml (eficiência de remoção de 99,37%) e para o emissário com 700m a mais, $8,98 \times 10^4$ NMP/100ml (eficiência de remoção de 99,71%), ao final do campo próximo.

Portanto, a diluição inicial, apesar de ser um fator muito importante no campo próximo, no campo afastado perde a sua influência. Neste caso, a única solução é aumentar o comprimento do emissário submarino ainda mais, proporcionando uma maior quantidade de tempo para o decaimento bacteriano.

A modelagem lagrangeana probabilística mostra que a isolinha de concentração de 2.500 NMP/100ml passa a não entrar mais em contato com a zona balneável quando o emissário é estendido de 2.000m como pode ser constatado na Figura 28.

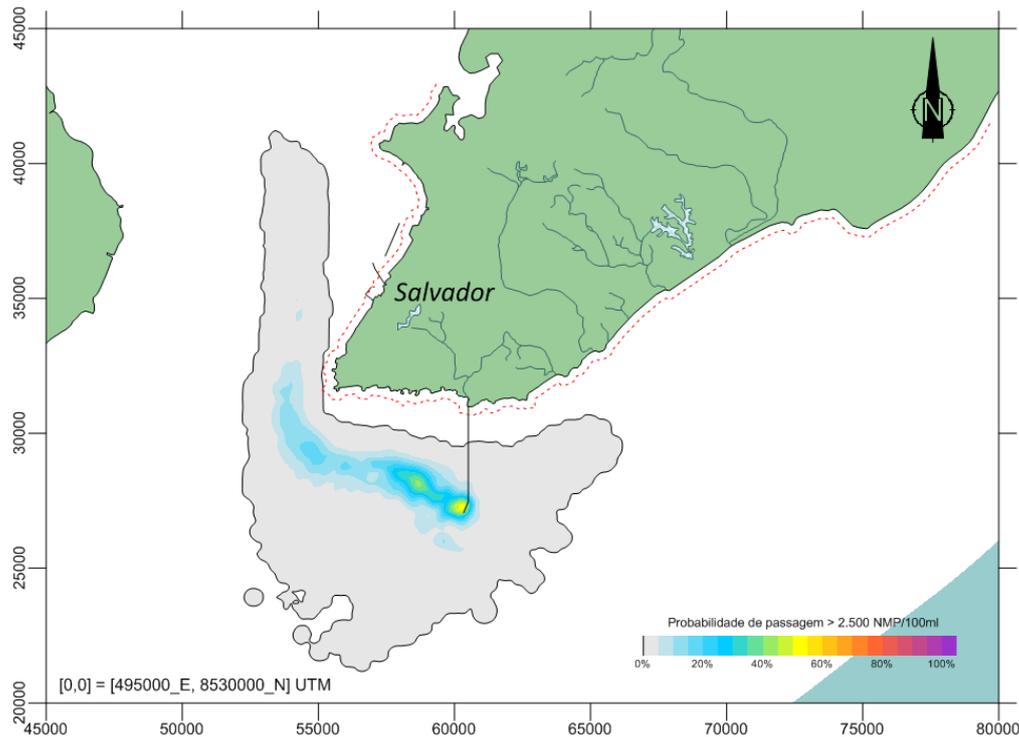


Figura 28 – Mapa de isolinhas de probabilidade de permanência de colimetria no ESRV com valor acima de 2.500 NMP/100ml para o Cenário 6 (P_2000) de verão.

4. Solução proposta

Para que o SDORV atenda à legislação ambiental vigente, seu emissário submarino deve ser estendido em 2.000m, possuindo as seguintes características:

Tabela 12 – Características principais do novo SDORV.

Solução proposta		
Características	Valor	Unidade
Altura da chaminé de equilíbrio	35,23	m
Comprimento do ETRV	1.019	m
Comprimento do ESRV	4.000	m
Comprimento da tubulação difusora	445	m
Diâmetro da tubulação principal	1,75	m
Azimute da tubulação difusora	202	°
Número de orifícios difusores	90	-
Diâmetro dos orifícios difusores*	16,5-15,0	cm
Espaçamento entre cada seção de difusor	5	m

* Vide Tabela 5

Com essas modificações, o ESRV passará a ter uma diluição mínima média no campo próximo de 99,66%, valor superior a qualquer sistema de uma estação tratamento de

efluentes. No entanto, é interessante se ter uma estimativa do quanto custaria promover as alterações no SDORV aqui propostas.

No 3º Fórum Brasileiro de Investimento, em Agosto de 2005, o Secretário de Desenvolvimento, Roberto Moussallem de Andrade da SEDUR (Secretaria de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia), apresentou o valor dos investimentos necessários para a construção de cada unidade do Sistema de Disposição Oceânica do Jaguaribe, ainda a ser contruído.

O seu emissário submarino terá uma extensão total de 3.648m, chegando a uma profundidade de 40m e custará R\$ 99 milhões. Apesar de ser feito de Polietileno de Alta Densidade - PEAD, ao invés de concreto, é possível, através destes valores, se ter uma idéia do custo que se terá ao aumentar o comprimento do ESRV. Dado que os gastos correspondentes à ampliação da chaminé de equilíbrio são ínfimos quando comparados à expansão do emissário, estes serão desconsiderados nos cálculos.

Estima-se que o metro de um emissário submarino custe aproximadamente R\$ 27 mil. A Tabela 13 associa a cada cenário, seus custos.

Tabela 13 – Custos relacionados a cada situação.

Cenário	Custo da reforma do SDO (R\$ milhões)
1 (A_0)	-
2 (P_0)	-
3 (P_700)	23
4 (P_1000)	31
5 (P_1500)	44
6 (P_2000)	58
7 (P_2500)	71

Dessa forma, sendo o Cenário 6 (P_2000) o proposto como solução para o SDORV, o custo da suas obras deve ficar em torno de R\$ 58 milhões. Ressalta-se que este elevado investimento é necessário para que o SDORV atenda por completo a Resolução CONAMA 274/2000.

É importante lembrar que os altos valores referentes à construção de um Sistema de Disposição Oceânica são relativos principalmente à etapa de construção, ou seja, ao custo inicial (a construção do SDO do Jaguaribe custará R\$ 160 milhões). Já a operação deste sistema não demanda uma grande quantidade de capital, de modo que ao longo dos anos, o

alto investimento inicial é recuperado, tornando-o muitas vezes mais vantajoso do que uma Estação de Tratamento de Esgotos.

5. Conclusão

A construção do Sistema de Disposição Oceânica do Rio Vermelho, em meados da década de 1970, não contava na época com as ferramentas computacionais que hoje dispomos. Dessa forma, a previsibilidade das correntes marinhas e portanto da pluma do emissário não era precisa, o que acarretou no posicionamento do emissário em um local não adequado.

Através do SisBaHiA[®], neste trabalho foi possível mostrar a forte influência do Banco de Areia de Santo Antônio sobre as correntes hidrodinâmicas, o que acarreta no transporte da pluma de efluentes do ESRV até a costa da cidade de Salvador, atingindo-a com concentrações de Coliformes Termotolerantes acima do permitido pela Resolução CONAMA 274/2000.

Neste trabalho, foi feita a otimização da tubulação difusora de modo a melhorar a diluição inicial do efluente nas águas marinhas. Viu-se que apesar de se obter uma alta eficiência de diluição dentro do campo próximo, no campo afastado é necessário que a pluma fique sob a ação da radiação solar por um tempo suficiente para que haja o decaimento bacteriano até o atendimento à legislação ambiental. Para isto, foram analisados diversos cenários de prolongamento do emissário submarino.

A solução aqui proposta é para que a tubulação difusora passe a conter 445 m posicionada com uma angulação azimutal de 202°, 90 difusores com diâmetros que variem de 16,5 a 15,0 centímetros (vide Tabela 5), e que o emissário submarino seja prolongado em 2.000 metros, para que então, o atendimento à legislação ambiental seja total. De modo a vencer as perdas de carga que serão adicionadas ao sistema, a chaminé de equilíbrio deve ser aumentada em aproximadamente 12 metros. A estimativa de custo para o adequamento do sistema ficou em torno de R\$ 58 milhões.

Para que o Sistema de Disposição Oceânica do Jaguaribe não apresente problemas similares ao do Rio Vermelho, recomenda-se fortemente o uso da modelagem computacional no seu planejamento. As simulações devem levar em consideração a pluma de efluente dos dois sistemas, de modo a se ter uma visão sistêmica do processo.

6. Referências Bibliográficas

- CONAMA. Resolução n. 274, de 29 de novembro de 2000. Dispõe sobre os padrões de balneabilidade de águas.
- CONAMA. Resolução n. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.
- Çengel, Y. A.; Cimbala, J. M. (2006), *Fluid Mechanics – Fundamentals and Applications*. 1st ed. New York. McGraw-Hill
- De Andrade, R. M. (Agosto de 2005). *Projeto-Piloto de PPP da Bahia – Sistema de disposição Oceânica (SDO) do Jaguaribe*. São Paulo. 3º Forum Brasileiro de Investimento
- De Paula, T., 2009, *Análise Hidrodinâmica e de Renovação de Massas d'Água na Lagoa Rodrigo de Freitas através do Uso de Modelagem Computacional*. Projeto de Graduação (Dezembro), Escola Politécnica / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
- Feitosa, R. C. (2007). *Acoplamento de modelos de campo próximo e campo afastado com cinética de decaimento bacteriano variáveis – aplicações em emissários submarinos*. Tese de D. Sc. (Novembro), COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
- Gonçalves, F. B.; Souza, A. P. (1997). *Disposição Oceânica de Esgotos Sanitários – História, Teoria e Prática*. 1ª ed. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES
- Kaufmann, C., 2009, *Estudo hidrodinâmico e de qualidade de água após revitalização do canal do fundão, Baía de Guanabara – RJ*. Tese de M. Sc. (Abril), COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
- Ludwig, R. G. (1998). *Environmental Impact Assessment – Siting and desing of submarine outfalls*. OMS
- Machado, B. V. Z.; Da Silva, R. M. L. C. F., 2010, *Análise da Influência da Baía da Guanabara na Qualidade da Água das Praias Oceânicas Adjacentes através da*

Modelagem Computacional. Projeto de Graduação (Agosto), Escola Politécnica / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Roberts, P. J. W., 1979, *Line Plume and Ocean Outfall Dispersion*. Journal of Hydraulics Division, ASCE, 105 (HY4), pp. 313-330

Rosman, P. C. (2008). *Referência Técnica do SisBaHiA[®]*. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC

Rosman, P. C. (2009). *Modelagem computacional para suporte ao monitoramento e gestão ambiental da área de influência do emissário submarino da Barra da Tijuca, RJ – RJ / RELATÓRIO FINAL*. COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Oceânica. Rio de Janeiro: Projeto COPPETEC PENO-12243

Rosman, P. C. (2010). *Modelagem para suporte ao monitoramento ambiental da área de influência do emissário submarino do Rio Vermelho – Salvador, BA – RJ / RELATÓRIO FINAL*. COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Oceânica. Rio de Janeiro: Projeto COPPETEC PENO-7106.

Sampaio, M., 2003, *Estudo de Circulação Hidrodinâmica 3D e Trocas de Massas d'Água da Baía de Guanabara – RJ*. Tese de M. Sc. (Março), COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Souza, J. F. A.; Azevedo, J. L. L.; Oliveira, L. R.; Soares, I. D. (2008). *Emissários submarinos – uma alternativa para a disposição final de efluentes em cidades costeiras*. Rio Grande – RS: FURG

Sperling, M. V. (2005). *Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos*. Belo Horizonte – MG: UFMG

Tian, X., Roberts, P. J. W., Daviero, G. J., 2004, *Marine Wastewater Discharges form Multiport Diffusers*. II: Unstratified Flowing Water, Journal of Hydraulic Engineering, v.130, n. 12, pp. 1147-1155

Topázio, E. F. (2003). *Modelagem de pluma de emissários com T_{90} variável na costa oceânica de Salvador, BA*. Tese de M. Sc. (Março), COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Sites pesquisados

Soler & Palau – Soluções Inovadoras

URL: http://www.solerpalau.pt/formacion_01_29.html

EMBASA

URL: <http://www.embasa.gov.ba.br/>

IMA

URL: <http://www.cra.ba.gov.br/>

SEMA

URL: www.meioambiente.ba.gov.br/

SEIA

URL: www.seia.ba.gov.br/

Anexo 1 – Rotina de Rawn

A rotina de cálculo que serviu à elaboração de um programa adequado de computação foi retirada de Gonçalves & Souza (1997) e é descrita a seguir:

- a) Estimar o valor de E_1 e depois o valor de q_1 com auxílio do valor de C_1 :

$$q_1 = C_1 \frac{\pi}{4} d_1^2 \sqrt{2gE_1}$$

- b) Calcular a velocidade no tubo e a carga de velocidade:

$$V_1 = \Delta V_1 = \frac{q_1}{\pi/4 D^2}$$

- c) Passando ao segundo orifício calcula-se E_2 :

$$E_2 = E_1 + h_{f1} + \frac{\Delta s}{s} \Delta z_1$$

Onde Δz_n corresponde à inclinação da tubulação difusora, se existir.

- d) A relação $\frac{V_1^2/2g}{E_2}$ é também calculada para entrar nas expressões que definem C_2 e q_2 :

$$q_2 = C_2 a_2 \sqrt{2gE_2}$$

- e) Calcula-se a seguir V_2 :

$$V_2 = V_1 + \Delta V_2 = V_1 + \frac{q_2}{\pi/4 D^2}$$

- f) Continuar então o procedimento usando as relações gerais:

$$C_n = \text{função de } \frac{V_{n-1}^2/2g}{E_2};$$

$$q_n = C_n a_n \sqrt{2gE_n};$$

$$\Delta V_n = \frac{q_n}{\pi/4 D^2};$$

$$V_n = V_{n-1} + \Delta V_n;$$

h_{fn} = perda de carga por atrito no trecho de ordem n, calculada pela expressão escolhida;

$$E_{n+1} = E_n + h_{fn} + \frac{\Delta s}{s} \Delta z_n.$$