

# Modelagem hidrodinâmica de plumas de emissários submarinos na costa de Rio Grande/RS

**José. F. A. Souza<sup>1</sup>; L. R. Oliveira<sup>2</sup>, José L.L. Azevedo<sup>3</sup>, Ivan D. Soares<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Física - Universidade Federal do Rio Grande. Doutorando do Curso de Pós-graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica da FURG, Rio Grande (RS), [zefran@ee.furg.br](mailto:zefran@ee.furg.br)<sup>3</sup>

<sup>2</sup> Fundação Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Doutorando do Curso de Pós-graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica da FURG, Rio Grande (RS) [leopoldorota@yahoo.com.br](mailto:leopoldorota@yahoo.com.br)

<sup>3</sup> Fundação Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Doutorando do Curso de Pós-graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica da FURG, Rio Grande (RS) [ctijlla@yahoo.com.br](mailto:ctijlla@yahoo.com.br)

<sup>4</sup> Departamento de Física/Universidade Federal do Rio Grande. Professor do Curso de Pós-graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica da FURG, Rio Grande (RS), [dfsivan@furg.br](mailto:dfsivan@furg.br)

**RESUMO:** No trabalho é feita uma descrição sucinta do sistema de disposição oceânica de efluentes e das forçantes que atuam na formação da pluma. São apresentadas as características físicas de alguns sistemas em operação no Brasil e no mundo. Em seguida são apresentadas as equações do modelo hidrodinâmico e os modelos de fechamento da turbulência que serão implementados no POM.

**PALAVRAS CHAVE:** Modelos de turbulência, fechamento da turbulência, emissários submarinos, plumas

**ABSTRACT:** In this work is done a brief description of the ocean disposal effluents system and of the forcing that act in the plume formation. The physics characteristics of some systems in operation in Brazil and in the world are presents. Soon after are presents the hydrodynamic model equations and the closure turbulence models that will be implemented in the Princeton Ocean Model (POM).

**KEYWORDS:** Turbulence models, Turbulence closures, outfalls, plumes

## 1. INTRODUÇÃO:

É prática comum, em qualquer cidade, a descarga de esgotos nos corpos de água mais próximos e, em geral, sem qualquer preocupação em relação às conseqüências ambientais. Nas cidades costeiras, a utilização de Emissários Submarinos para disposição final de esgotos domésticos e industriais tem se mostrado uma prática crescente e, neste sentido, é importante que se levante e discuta o problema da disposição oceânica de efluentes por meio de emissários submarinos e se investigue a real capacidade de assimilação destes corpos d'água.

Um sistema de Disposição Oceânica de Efluentes é constituído por três unidades básicas: (1) unidade de condicionamento prévio dos efluentes; (2) emissário e (3) tubulação difusora.

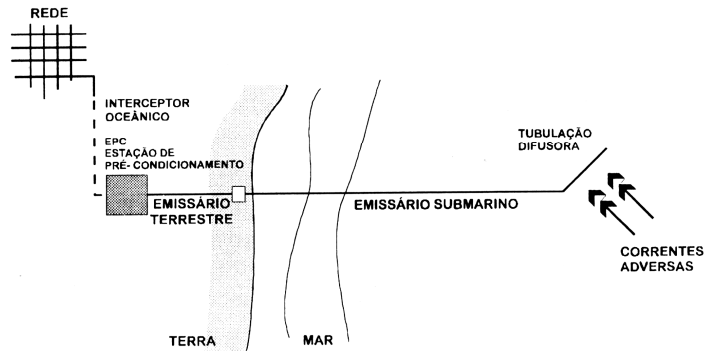


Figura 1. Unidades componentes de um sistema de um sistema de disposição oceânica de esgotos (fonte: Gonçalves, 1997)

O condicionamento dos esgotos (1) para lançamento no mar é realizado em uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) e, geralmente, consiste na remoção de sólidos grosseiros e materiais flutuantes. Em alguns lugares a legislação ambiental exige a remoção prévia de matéria orgânica (DEP/Flórida [5]). O emissário (2) é uma canalização que transporta os efluentes desde a ETE até seu destino final. É constituído de uma parte terrestre e outra oceânica ficando, esta última, assentada no assoalho marinho onde é ancorada. Na porção final do emissário submarino são dispostos vários bocais ou orifícios que constituem a chamada tubulação difusora (3) através da qual o efluente é lançado nas águas marinhas. O comprimento do emissário ou, a distância de lançamento dos despejos, depende do nível de condicionamento prévio dado ao esgoto, da profundidade de lançamento e, principalmente, do regime de correntes marinhas e nível de turbulência local, o qual é determinado pelas seguintes forças: maré, clima de ondas e regime de ventos.

Cada orifício difusor forma um jato efluente com quantidade de movimento muito maior, e com densidade significativamente menor, que a corrente marinha circunvizinha. Cada parcela de efluente, ao deixar o orifício difusor com a quantidade de movimento imposta pelo fluxo interno ao emissário, fica sujeita a uma força ascensional (buoyancy) provocada pela diferença de densidades entre o esgoto e a massa líquida circunvizinha. Simultaneamente, a turbulência provocada pela diferença das quantidades de movimento promove mistura entre o jato e a água vizinha, eleva a densidade da mistura e forma uma estrutura semelhante a uma pluma.

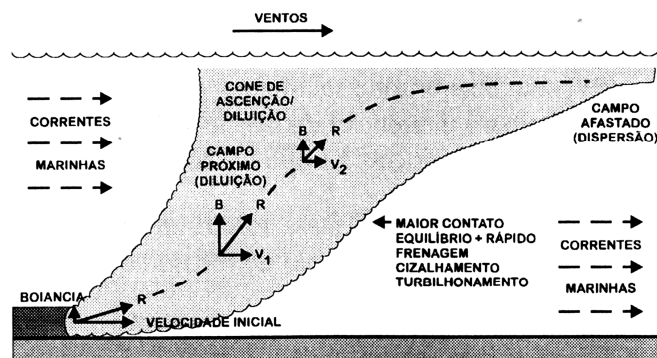


Figura 2. Aspecto do jato efluente (Fonte: Gonçalves, 1997)

Assim, à medida que a pluma formada se afasta da tubulação difusora, tem sua velocidade gradualmente diminuída até igualar a da corrente marinha, quando então, é arrastada “ao sabor” da mesma. Ao mesmo tempo, à medida que a pluma se eleva na coluna d’água, vai incorporando água da vizinhança e aumentando a sua densidade até atingir uma altura onde as densidades se igualam e o movimento ascensional cessa. A partir desse momento a pluma se torna dinamicamente neutra e é transportada passivamente pelo escoamento ambiente. Vemos então que a quantidade de movimento do jato constitui fator relevante na diluição inicial do efluente numa região próxima da tubulação difusora chamada “campo próximo” enquanto a intensidade e orientação das correntes marinhas constituem o fator governante da dispersão de plumas de emissários submarinos longe do difusor chamada “campo afastado”. Na Tabela.1 são apresentadas, a título de ilustração, as características de alguns emissários submarinos.

**Tabela 1. Características de alguns emissários submarinos (Fontes: Ref. [15], Ref.[5] )**

Local	Comprimento emissário submarino (m)	Diâmetro Emissário ( m)	Num. Orifícios difusores	Diâmetro orifícios difusores (cm)	Comprimento tubulação. Difusora ( m )	Prof. Descarga ( m)	Descarga Aproximada (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /dia)
Ipanema Rio de Janeiro	4.325	2,40	180	17	450	27	---
Santos, São Paulo	4.000	1,75	40	30	200	10	---
Fortaleza, Ceará	3.205	1,50	120	11	600	12	---
Salvador, Bahia	2.350 <sup>a</sup>	1,75	70	15	350	27	---
São Sebastião, São Paulo	1.000 <sup>a</sup>	0,15	7	5	3,50	11	---

(a) Inclui o comprimento da tubulação difusora

## 2 RELEVÂNCIA:

Dada a grande capacidade depuradora dos oceanos, a disposição oceânica de esgotos tem sido utilizada, em muitos países, como alternativa de disposição final de efluentes após um condicionamento prévio que pode variar desde simples tratamento preliminar para remoção de sólidos grosseiros e patogênicos, tratamento secundário para remoção de matéria orgânica e, até tratamento em nível terciário para remoção de nutrientes, dependendo da natureza do efluente e do rigor da legislação ambiental local. De acordo com Salas (2000), a população da América Latina cresce a uma taxa anual de 1,7% mas, a maior parte desse crescimento é absorvido pelas grandes cidades costeiras cuja taxa média de crescimento anual excede os 3,8%. Isso exerce nestas cidades uma forte demanda por serviços de saneamento básico tais como tratamento e distribuição de água e tratamento e disposição final de esgotos.

A poluição por esgotos domésticos é o principal problema enfrentado pelas cidades balneárias. A infraestrutura sanitária, adequada na maior parte do ano, se mostra ineficiente para atender a grande demanda dos períodos de veraneio, quando a população destas localidades aumenta por um fator de aproximadamente dez. A título de exemplo, citamos Imbé/RS [8], cuja população passa de 15.700 para 160.000 habitantes e Tramandaí/RS [16] de 35.000 para 400.000 habitantes. Se observarmos que os processos convencionais de tratamento de esgotos são do tipo biológico e, que estes sistemas são muito sensíveis às flutuações de carga de esgoto, temos uma idéia da dificuldade de adequação dos sistemas convencionais de tratamento as condições extremas de alta temporada. Temos assim uma idéia da importância de compreender os processos que influem na dispersão de plumas de emissários submarinos na região litorânea.

### 3. O MODELO HIDRODINÂMICO

#### 3.1 Equações básicas do movimento

O modelo hidrodinâmico é obtido a partir das equações da continuidade, momentum e transporte de escalares escritas para as variáveis instantâneas.

Equação da Continuidade;

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Equações do Momentum

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} - f \tilde{u}_j \varepsilon_{ij3} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} - \frac{\tilde{\rho} g}{\rho_0} \delta_{i3} + \nu \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j^2} \quad (2)$$

Equação de Transporte

$$\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x_j} = \Gamma \frac{\partial^2 \tilde{\phi}}{\partial x_i^2} + S_\phi \quad (3)$$

Nestas equações  $\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}, \tilde{p}$  e  $\tilde{\phi}$  representam os valores instantâneos das componentes da velocidade, pressão e da propriedade escalar que pode estar representando a temperatura, salinidade ou a concentração de um poluente qualquer enquanto  $\nu$  e  $\Gamma$  são, respectivamente, os coeficientes de viscosidade e difusão moleculares.  $S_\phi$  representa um termo fonte do escalar. Foi implicitamente adotada a aproximação de Boussinesq na equação (2).

As equações acima são exatas e fornecem a solução em cada ponto e instante não precisando, por isso, incluir (explicitamente) qualquer termo de turbulência. Esta já é resolvida, ou já está incluída, implicitamente, nos valores instantâneos que aparecem nas equações. Este conjunto de equações representa de forma adequada qualquer tipo de escoamento desde que sejam fornecidas as condições iniciais e de contorno apropriadas. Entretanto, a inexistência de solução analítica para estas equações nos obriga a lançar mão de algum recurso numérico que permita alcançar tal solução. Apesar de dispormos de procedimentos numéricos para resolver as equações (1) a (3), a velocidade de processamento e a capacidade de armazenamento dos computadores ainda é insuficiente para permitir a solução de todas as escalas de um escoamento turbulento de interesse prático para escoamentos ambientais.

#### 3.2 Equações do escoamento médio

Uma das alternativas disponíveis para contornar o problema é aplicar sobre as variáveis instantâneas das equações (1) a (3) a técnica da separação de Reynolds, a qual consiste em separá-las em uma parte média e outra flutuante,

$$\tilde{u}_i = U_i + u_i \quad \tilde{p} = P + p \quad \tilde{\phi} = \Phi + \phi \quad \tilde{T} = \bar{T} + T' \quad (4)$$

A substituição de (4) no sistema (1) a (3) e posterior promediação das equações assim obtidas resulta num sistema de equações representativas do escoamento médio com incógnitas,  $U$ ,  $V$ ,  $W$ ,  $T$ ,  $S$  e  $C$ . Após a promediação as equações assumem a forma:

Equação da Continuidade;

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

Equações do Momentum

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - f U_j \varepsilon_{ij3} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\rho g}{\rho_0} \delta_{i3} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \quad (6)$$

Transporte de Calor

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + U_i \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma^{hot} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - \overline{u_i T'} \right) \quad (7)$$

Transporte da Salinidade

$$\frac{\partial \bar{S}}{\partial t} + U_i \frac{\partial \bar{S}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma^{sal} \frac{\partial \bar{S}}{\partial x_i} - \overline{u_i S'} \right) \quad (8)$$

Transporte de Constituintes

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma^{const} \frac{\partial C}{\partial x_i} - \overline{u_i C'} \right) \quad (9)$$

onde  $U$ ,  $V$ ,  $W$ ,  $T$ ,  $S$  e  $C$  representam o valor médio destas variáveis. Todavia, o processo resulta no surgimento de correlações turbulentas do tipo  $\overline{u_i u_j}$  (tensões de Reynolds),  $\overline{u_i T'}$ ,  $\overline{u_i S'}$ ,  $\overline{u_i C'}$  que representam novas incógnitas no sistema de equações (seis na equação (6), três na (7), três na (8) e três na (9)). Obviamente o sistema está agora “*em aberto*”, no sentido de que há mais incógnitas do que equações e a solução só será possível se estas correlações forem determinadas, ou estimadas, de alguma forma independente do sistema (5) a (9). A determinação independente destas correlações, para que o número de incógnitas se ajuste ao número de equações disponíveis, é chamado “*fechamento*” ou, “*problema de fechamento*” da turbulência. A modelagem destas correlações é o objetivo dos modelos de turbulência.

### 3.3 Modelos de turbulência

A escolha do tipo de modelo para a simulação do escoamento turbulento deve atender algumas premissas desejáveis. Em princípio o modelo deve ser matematicamente simples e envolver o menor número possível de conceitos físicos. Além disso, deve ser capaz de simular o maior número possível de escoamentos sem a necessidade de ajustes nas suas constantes ou equações. Finalmente, o modelo deve ser numericamente estável [7].

Um conceito importante sobre a turbulência, é que ela é uma entidade que pode ser gerada, dissipada e transportada por advecção e difusão [7]. Um modelo que tenha pretensão de ser razoavelmente realista e geral deve ser capaz de considerar estes processos. Entretanto, muitos modelos, até que bem sucedidos em alguns casos, não observam tais requisitos e por isso não devem ser extrapolados para situações muito distintas daquelas para as quais foram validados [8].

O fato da turbulência ser passível de transporte levou a proposição de um critério de classificação dos modelos de turbulência em função do número de equações de transporte consideradas. Equações de transporte são equações diferenciais (do tipo (9)) que fazem um balanço da conservação da entidade turbulenta que está sendo transportada. Alguns modelos são baseados em equações algébricas (modelos algébricos) que relacionam certas quantidades turbulentas com variáveis do escoamento médio e, portanto não consideram o transporte da turbulência.

Os vários modelos de turbulência encontrados na bibliografia vão de simples “modelos algébricos” a modelos mais complexos com uma equação de transporte (evolutiva) e até duas equações de transporte para entidades características da turbulência. Estes últimos, apesar de mais “pesados” do ponto de vista computacional, são capazes de reproduzir com mais fidelidade os fenômenos de pequena escala associados aos processos turbulentos e portanto mais adequados para a simulação da turbulência nos escoamentos mais complexos como é o caso da dispersão de plumas de emissários submarinos.

Os modelos a duas equações, em geral, se enquadram em uma das famílias do tipo  $k-\varepsilon$ ,  $k-kL$  ou  $k-\omega$ , onde  $k$  representa a energia cinética turbulenta. Utilizam uma equação evolutiva (de transporte) para a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e uma segunda equação evolutiva, para outra entidade característica da turbulência, a qual pode ser a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta ( $\varepsilon$ ), uma escala característica de comprimento ( $kL$ ) ou uma escala característica da frequência da turbulência ( $\omega = \varepsilon/k$ ). Desta família, os modelos de turbulência mais utilizados são o  $k-\varepsilon$  e o  $k-kL$ , os quais serão descritos aqui.

### 3.3.1 O modelo $k-kL$

É composto pela equação para a energia cinética turbulenta “ $k$ ” mais uma equação para a escala característica do comprimento “ $kL$ ” como

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k + D + B - \varepsilon \quad (10)$$

$$P_k = \nu_t \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (11)$$

$$D = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \nu_t \frac{\partial k}{\partial z} \right] \quad (12)$$

$$B = \Gamma_t \frac{g}{\rho_o} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (13)$$

$$\varepsilon = c_L \frac{k^{3/2}}{L} \quad (14)$$

e

$$\frac{\partial (kL)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left[ \nu_L \frac{\partial (kL)}{\partial z} \right] = \frac{L}{2} \left[ c_{L1} P_k + c_{L3} B - \varepsilon \cdot \left( 1 + E_2 \left( \frac{L}{L_z} \right)^2 \right) \right] \quad (15)$$

onde  $\nu_t = \sqrt{2k} S_L L$ ,  $\nu_L = c_k \sqrt{k} L$ ,  $c_k = \sqrt{2} S_q$  e  $Lz$  é a função de aproximação da parede.  $P_k$ ,  $D$ ,  $B$  e  $\varepsilon$  são definidos pelas expressões indicadas na equação (11) a (14). Os parâmetros empíricos que aparecem nas equações (10) e (15) foram determinados experimentalmente e, conforme as ref [12], ref [13], ref [4] e ref [14], valem:

$c_L$	$c_{L1}$	$c_{L3}$	$E_2$	$S_q$	$S_L$
0,17	0,9	0,9	1,33	0,2	0,2

Completam o modelo, as equações algébricas que permitem determinar as correlações incógnitas que aparecem no sistema (5) a (9), isto é;

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (16)$$

$$-\overline{u_i T'} = \Gamma_t \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \quad (17)$$

$$-\overline{u_i S'} = \Gamma_t \frac{\partial \bar{S}}{\partial x_i} \quad (18)$$

### 3.3.2 O modelo $k - \varepsilon$

Assim como o modelo acima, este utiliza a equação para a energia cinética turbulenta “ $k$ ” mais uma equação para a escala característica do comprimento representada, desta vez, pela taxa de dissipação da energia cinética turbulenta “ $\varepsilon$ ”. Desta forma,

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k + D + B - \varepsilon \quad (10)$$

e

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] = \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P_k + C_{3\varepsilon} B - c_{2\varepsilon} \varepsilon) \quad (17)$$

$P_k$ ,  $B$  e  $\varepsilon$  são aqueles definidos pelas expressões (11) a (14). As constantes do modelo,  $c_{1\varepsilon}$ ,  $c_{2\varepsilon}$ ,  $c_\mu$ ,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  foram determinadas experimentalmente, seus valores são bem aceitos e apresentados no quadro abaixo ([4], [14]).

$c_{1\varepsilon}$	$c_{2\varepsilon}$	$c_{3\varepsilon} (B < 0)$	$c_{3\varepsilon} (B > 0)$	$c_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
1,44/1,51	1,92	-0,4	1,0	0,09	1,0	1,3

Completam o modelo, as equações algébricas que permitem determinar as correlações incógnitas que aparecem no sistema (5) a (9), isto é;

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (18)$$

$$-\overline{u_i T'} = \Gamma_t \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \quad (19)$$

$$-\overline{u_i S'} = \Gamma_t \frac{\partial \bar{S}}{\partial x_i} \quad (20)$$

A maioria dos modelos de turbulência (a duas equações) acoplados aos mais diversos modelos hidrodinâmicos pertencem a uma destas categorias.

Mellor e Yamada (1974, 1982) alegando haver certa confusão nas nomenclaturas utilizadas para a classificação dos modelos de turbulência propuseram uma classificação que fosse semanticamente neutra. Para tanto, propuseram que os modelos fossem classificados por níveis de complexidade sendo o mais complexo classificado como de Nível 4, enquanto o mais simples, de Nível 1. O modelo de Nível 4 corresponde ao chamado modelo das “tensões de Reynolds” onde uma equação diferencial parcial de transporte (evolutiva) é prescrita para cada correlação incógnita nas equações (6) a (9). Deixa o modelo extremamente “pesado” e não é utilizado em escoamentos ambientais. O modelo de Nível 1 corresponde aos modelos algébricos também pouco utilizados hoje em dia.

O modelo de turbulência acoplado ao Princeton Ocean Model (*POM*) é um modelo a duas equações do tipo  $k-kL$  que, na classificação de Mellor e Yamada [13], corresponde ao modelo de Nível  $2\frac{1}{2}$ .

### 3.3.3 O modelo Nível 3 de Mellor e Yamada

Na notação utilizada por estes autores  $q^2$  representa o dobro da energia cinética turbulenta, isto é,  $q^2 = 2k$ .

$$\frac{Dq^2}{Dt} + U_j \frac{\partial q^2}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{5}{3} q \lambda_1 \frac{\partial q^2}{\partial z} \right] = -2\overline{uw} \frac{\partial U}{\partial z} - 2\overline{wv} \frac{\partial V}{\partial z} + 2\beta g \overline{w\theta} - 2 \frac{q^3}{\Lambda_1} \quad (21)$$

*Para as tensões de Reynolds:*

$$\overline{u^2} = \frac{q^2}{3} + \frac{\ell_1}{q} \left( -4\overline{wu} \frac{\partial U}{\partial z} + 2\overline{wv} \frac{\partial V}{\partial z} \right) + \frac{2\beta g \ell_1}{q} \overline{w\theta} \quad (22)$$

$$\overline{v^2} = \frac{q^2}{3} + \frac{\ell_1}{q} \left( -4\overline{wv} \frac{\partial V}{\partial z} + 2\overline{wu} \frac{\partial U}{\partial z} \right) - \frac{2\beta g \ell_1}{q} \overline{w\theta} \quad (23)$$

$$\overline{w^2} = \frac{q^2}{3} + \frac{\ell_1}{q} \left( 2\overline{wu} \frac{\partial U}{\partial z} + 2\overline{wv} \frac{\partial V}{\partial z} \right) + \frac{4\beta g \ell_1}{q} \overline{w\theta} \quad (24)$$

$$\overline{uv} = -\frac{3\ell_1}{q} \left( \overline{wu} \frac{\partial V}{\partial z} + \overline{wv} \frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad (25)$$



$$\overline{uw} = -\frac{3\ell_1}{q} \left[ (\overline{w^2} - C_1 q^2) \frac{\partial U}{\partial z} \right] + \frac{3\ell_1}{q} \beta g \overline{u\theta} \quad (26)$$

$$\overline{vw} = -\frac{3\ell_1}{q} \left[ (\overline{w^2} - C_1 q^2) \frac{\partial V}{\partial z} \right] + \frac{3\ell_1}{q} \beta g \overline{v\theta} \quad (27)$$

*Para o Fluxo de Calor:*

$$\overline{u\theta} = -\frac{3\ell_2}{q} \left[ \overline{uw} \frac{\partial \Theta}{\partial z} + \overline{w\theta} \frac{\partial U}{\partial z} \right] \quad (28)$$

$$\overline{v\theta} = -\frac{3\ell_2}{q} \left[ \overline{vw} \frac{\partial \Theta}{\partial z} + \overline{w\theta} \frac{\partial V}{\partial z} \right] \quad (29)$$

$$\overline{w\theta} = -\frac{3\ell_2}{q} \left[ \overline{ww} \frac{\partial \Theta}{\partial z} - \beta g_z \overline{\theta^2} \right] \quad (30)$$

*Para a Variância de temperatura:*

$$\frac{D\overline{\theta^2}}{Dt} - \frac{\partial}{\partial z} \left[ q\lambda_3 \frac{\partial \overline{\theta^2}}{\partial z} + \alpha \frac{\partial \overline{\theta^2}}{\partial z} \right] = -2\overline{w\theta} \frac{\partial \Theta}{\partial z} - 2\frac{q}{\Lambda_2} \overline{\theta^2} \quad (31)$$

Nas equações (21) a (31),  $\ell_1$  e  $\ell_2$  são escalas de comprimento relacionadas com a redistribuição de momentum e calor, respectivamente,  $\Lambda_1$  e  $\Lambda_2$  as escalas de comprimento associadas com a taxa de dissipação de momentum e calor, respectivamente,  $\lambda_1$  e  $\lambda_3$  as escalas de comprimento associadas com a difusão de momentum e calor, respectivamente e  $\lambda_3$ , a escala de comprimento relacionada com a difusão da variância da temperatura. Os parâmetros  $C_1$  estão relacionados, respectivamente, com a influência da taxa de deformação do escoamento médio e da flutuação (buoyancy) sobre a redistribuição de energia.

Com o objetivo de simplificar, as escalas de comprimento são expressas em função de uma única escala  $\ell$ , chamada escala mestra de comprimento. Assim,

$$\begin{aligned} \ell_1 &= A_1 \cdot \ell & \text{e} & & \ell_2 &= A_2 \cdot \ell \\ \Lambda_1 &= B_1 \cdot \ell & \text{e} & & \Lambda_2 &= B_2 \cdot \ell \end{aligned} \quad (32)$$

com  $(A_1, A_2, B_1, B_2, C_1) = (0.92, 0.74, 16.6, 10.1, 0.08)$  e  $\lambda_1 = \lambda_3 = 0,23$ .

#### 4. Hipótese:

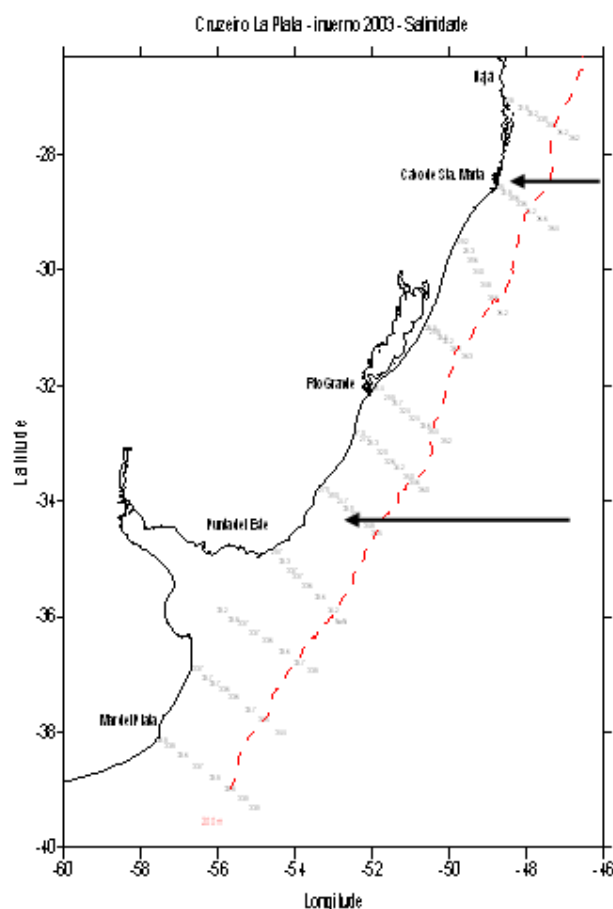
A dispersão da pluma depende das condições locais como correntes marinhas, existência ou não de estratificação, etc., e é independente do modelo de turbulência. Entretanto, sua descrição adequada depende fortemente da escolha do modelo de turbulência.

#### 5. OBJETIVOS:

Os objetivos do trabalho são: (i) estudar a hidrodinâmica e as características dispersivas do litoral do Rio Grande do Sul na região adjacente à Rio Grande; (ii) incorporar ao *POM*, na forma de subrotinas, os modelos do tipo  $k-\epsilon$  e Mellor e Yamada Nível 3, simular a dispersão de plumas para diferentes condições ambientais (cenários) e fazer uma comparação entre estes modelos de turbulência a partir dos resultados obtidos. (iii) fazer uma série de simulações que permitam escolher os locais mais adequados para implantação de emissários na região litorânea.

## 6. REGIÃO DE ESTUDO:

O estudo será conduzido na região litorânea, aproximadamente entre os paralelos 28° S (Santa Marta) e 34° S (Chuí). O Laboratório de Oceanografia Física da FURG, através do Projeto La Plata, vem há algum tempo estudando a região e levantando dados que permitam uma melhor compreensão dos processos físicos envolvidos na circulação da água na plataforma.



**Figura 3.** Região de estudo (Fonte: Laboratório de Oceanografia Física da FURG )

A Figura 3., obtida destes estudos, mostra a região de interesse e retrata um dos cruzeiros realizados para obtenção dos perfis de temperatura e salinidade em várias estações oceanográficas, necessários ao conhecimento da estrutura vertical típica das estações de inverno e verão.

## 7. DISCUSSÃO

Modelos do tipo  $k-\varepsilon$  e  $k-kL$  são amplamente utilizados como modelos de turbulência acoplados aos mais diversos modelos hidrodinâmicos. Eles têm sido bem descritos e comparados para diferentes tipos de escoamentos como camada limite atmosférica, camada limite de fundo, camada superficial oceânica, em canais, etc. O modelo de Mellor e Yamada Nível 3, não se tem notícia da sua utilização na simulação de escoamentos ambientais. Na modelagem de plumas de emissários submarinos, entretanto, não se tem notícia de estudos comparativos entre quaisquer dos modelos citados.

## REFERÊNCIAS

1. ALVES, FERNANDO N. A. Estudo do Transporte de Manchas de Óleo por um modelo Lagrangeano de partículas na Bacia de Pelotas. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica. Fundação Universidade Federal do Rio Grande, RS (2006)
2. ARASAKI, E.; ORTIZ, JAYME, P. ( ). Diagnosis for Knowing Submarine Outfall Plume Dispersion. Capturado do site [www.iahr.org/beijing\\_proceedings/Theme\\_D](http://www.iahr.org/beijing_proceedings/Theme_D)
3. BOÇON, FERNANDO T. Modelagem Matemática do Escoamento e da Dispersão de Poluentes na Microescala Atmosférica. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC. (1998)
4. BURCHARD, HANS. Applied Turbulence Modelling in Marine Waters. Springer-Verlag. Germany, (2002).
5. CETESB 2006 - Emissários submarinos: projeto, avaliação de impacto ambiental e monitoramento. Editores Cláudia Condé Lamparelli, Jayme Pinto Ortiz; revisão técnica Cláudia Condé Lamparelli ... [et al.]. - São Paulo : SMA, 2006.
6. DEP/FLÓRIDA – Department of Environmental Protection. General Facts About Domestic Wastewater in Florida in <http://www.dep.state.fl.us/water/wastewater/dom/domfact.htm> capturado em 12/10/2006
7. DESCHAMPS, CÉSAR J. Modelos Algébricos e Diferenciais in TURBULÊNCIA. Volume 1, Cap 3. ABCM - Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, Rio de Janeiro, 1998.
8. EIGER, SÉRGIO. *Modelos de Escoamentos Turbulentos in Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 1*. Coleção da ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1989.
9. GONÇALVES, F. B.; SOUZA, A. P. Disposição Oceânica de Esgotos Sanitários – História, Teoria e Prática. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES. (1997)
10. IMBÉ/RS. Capturado do sitio <http://www.imbe.rs.gov.br/historico.htm> em 26/10/2007
11. LUDWIG, RUSSELL G. Environmental Impact Assessment – Siting and design of submarine outfalls. OMS. (1988).
12. MELLOR, G.L.; YAMADA, T. A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers. Journal of Atmospheric Sciences, 31, 1791-1806, (1974).
13. MELLOR, G.L.; YAMADA, T. Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems. Reviews of Geophysics and Space Physics, 20, 851-875, (1982).
14. RODI, WOLFANG. *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics*. IAHR-International Association for Hydraulic Research 3<sup>a</sup> ed. (1993)
15. SALAS, HENRY J. Submarine Outfalls a Viable Alternative for Sewage Discharge of Coastal Cities in America and Caribbean. Pan American Center for Sanitary Engineering

- and Environmental Sciences (CEPIS). Division of Health Environment / Pan American Organization OPS/CEPIS/PUB/00.57. (2000)
16. SOARES, IVAN D. The Southern Brazilian Shelf Buoyance-Dryven Currents. Ttese de Doutorado. Rodentiel School of Marine and Atmospheric Science. University of Miami, Miami, USA. (2003).
  17. SOUZA, JOSÉ F.A. Uma revisão sobre a turbulência e os modelos clássicos de turbulência. Monografia apresentada como requisito para progressão para a Classe de Professor Adjunto (2008).
  18. TRAMANDAÍ/RS. Capturado em 12/10/2007  
[http://www.tramandai.rs.gov.br/index.php?acao=conteudo&conteudos\\_id=9](http://www.tramandai.rs.gov.br/index.php?acao=conteudo&conteudos_id=9)