

ABNER DUARTE SOARES

**MODELAGEM DA DISPERSÃO DE TRÍTIO A PARTIR DE LIBERAÇÕES  
ACIDENTAIS POSTULADAS DE CENTRAIS NUCLEARES**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear – Profissional em Engenharia de Reatores.

Orientador: Prof. Dr. Celso Marcelo Franklin Lapa

Co-Orientador: Prof. Dr. Francisco Fernando Lamego Simões Filho

Rio de Janeiro

2010

Soares, Abner Duarte.

**Modelagem da dispersão de trítio a partir de liberações  
acidentais postuladas de centrais nucleares** / Abner Duarte  
Soares – Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2010.

113p. il.

Orientadores: Celso Marcelo Franklin Lapa e Francisco  
Fernando Lamego Simões Filho

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reatores) –  
Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2010.

1. SisBaHiA. 2. Modelagem. 3. Liberações Acidentais. 4.  
Trítio.

CDD  
CDU

MODELAGEM DA DISPERSÃO DE TRÍTIO A PARTIR DE LIBERAÇÕES  
ACIDENTAIS POSTULADAS DE CENTRAIS NUCLEARES

Abner Duarte Soares

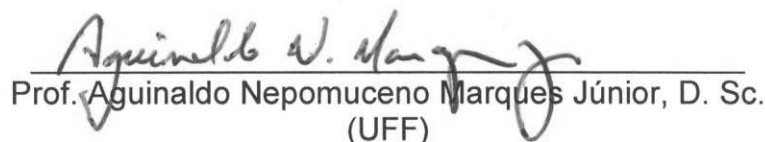
DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO  
EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE  
ENGENHARIA NUCLEAR DA COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA  
NUCLEAR COM PARTE DOS RQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRADO EM CIÊNCIA EM ENGENHARIA  
NUCLEAR – PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE REATORES.

Aprovado por:

  
Prof. Celso Marcelo Franklin Lapa, D. Sc.  
(Orientador)

  
Dr. Francisco Fernando Lamego Simões  
(Orientador)

  
Prof. Antônio Carlos de Abreu Mól, D. Sc.  
(IEN|CNEN)

  
Prof. Aquinaldo Nepomuceno Marques Júnior, D. Sc.  
(UFF)

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2010

*Ao meu pai, por seus princípios inflexíveis que guiarão minha vida.*

*À minha mãe por me incentivar a estudar.*

*Aos amigos, pela confiança depositada em mim.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Comissão Nacional de Energia Nuclear por ter dado os recursos necessários para que eu realizasse este trabalho.

Ao Instituto de Engenharia Nuclear pela capacitação através do seu programa de pós graduação e ter tido a oportunidade de aprender com excelentes profissionais.

Agradeço ao meu orientador, Celso Lapa, pelos seus conselhos e por sempre estar disposto a ajudar, mesmo quando o cenário não era favorável.

Ao meu orientador, Fernando Lamego, por seus ensinamentos e grande ajuda na realização deste trabalho.

Aos meus amigos de pós graduação que me deram força para superar as dificuldades, em especial ao André Aguiar, pois vencemos as dificuldades teóricas trabalhando juntos.

*“O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza de seus sonhos.”*

Elleanor Roosevelt

Resumo da Dissertação apresentada ao IEN/CNEN como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

## MODELAGEM DA DISPERSÃO DE TRÍTIO A PARTIR DE LIBERAÇÕES ACIDENTAIS POSTULADAS DE CENTRAIS NUCLEARES

Abner Duarte Soares

Junho de 2010

Orientadores: Prof. Dr. Celso Marcelo Franklin Lapa

Prof. Dr. Francisco Fernando Lamego Simões Filho

Programa: Engenharia Nuclear

Resumo:

Este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto de liberação acidental de Trítio, postulada a partir de reator de potência, através de modelagem ambiental no meio aquático. Para isso foram usados modelos computacionais hidrodinâmico e de transporte para a simulação da dispersão de trítio causada por um acidente em uma central nuclear do tipo CANDU 6, no sítio em construção de Angra 3 (PWR) no CNAAB. Este exercício foi realizado com auxílio de um sistema de códigos acadêmico desenvolvido pelo Coppe/UFRJ, chamado SisBaHiA.

O CANDU é um reator que usa a água pesada ( $D_2O$ ) como moderador e refrigerante do núcleo. Postulou-se então, um acidente do tipo LOCA (Loss of coolant accident) no sistema de resfriamento emergencial do núcleo (sem fusão), durante o qual foi quase instantaneamente perdido  $66 \text{ m}^3$  de refrigerante. Tal inventário continha  $35 \text{ PBq}$  de trítio e foi lançada uma carga sob forma líquida de  $9.7 \text{ TBq/s}$  próximo a praia de Itaorna, Angra dos Reis – RJ.

Aplicando-se os modelos citados acima em dois cenários (usina parada e em funcionamento), a diluição da atividade específica da pluma alcançou valores superiores aos níveis de referência para água do mar ( $1.1 \text{ MBq/m}^3$ ) previstos nas especificações técnicas do licenciamento apenas durante os primeiros 14 dias após o acidente. A diferença entre os dois cenários residiu basicamente na maior diluição alcançada das maiores concentrações no cenário com recirculação de água marinha (bombeamento e descarga) justamente nas primeiras duas semanas, quando as concentrações entre a Praia de Itaorna e a Ilha Sandri variaram  $1 \times 10^9$  e  $5 \times 10^5 \text{ Bq/m}^3$ . Após 180 dias a pluma não poderia mais ser detectada na Baía, pois sua atividade era inferior a mínima detectável ( $< 11 \text{ KBq/m}^3$ ).

Abstract of Dissertation presented to IEN/CNEN as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.)

## MODELLING OF TRITIUM DISPERSION FROM POSTULATED ACCIDENTAL RELEASE OF NUCLEAR POWER PLANTS

Abner Duarte Soares

June/2010

Advisors: Celso Marcelo Franklin Lapa, D. Sc.

Francisco Fernando Lamego Simões Filho, D. Sc.

Program: Nuclear Engineering

### Abstract:

This study has the aim to assess the impact of accidental release of tritium postulate from a nuclear power reactor through environmental modeling of aquatic resources. In order to do that it was used computational models of hydrodynamics and transport for the simulation of tritium dispersion caused by an accident in a CANDU reactor located in the ongoing Angra 3 site. This exercise was accomplished with the aid of a code system (SisBAHIA) developed in the Rio de Janeiro Federal University (Coppe/UFRJ).

The CANDU reactor is one that uses heavy water ( $D_2O$ ) as moderator and coolant of the core. It was postulated, then, the LOCA (Loss of coolant accident) accident in the emergency cooling system of the nucleus (without fusion), where was lost  $66\text{ m}^3$  of soda almost instantaneously. This inventory contained 35 PBq and was released a load of 9.7 TBq/s in liquid form near the Itaorna beach, Angra dos Reis – RJ.

The models mentioned above were applied in two scenarios (plant stopped or operating) and showed a tritium plume with specific activities larger than the reference level for seawater ( $1.1\text{ MBq/m}^3$ ) during the first 14 days after the accident. The main difference between the scenario without and with seawater recirculation (pumping and discharge) is based on the enhancement of dilution of the highest concentrations in the last one. This dilution enhancement resulting in decreasing concentrations was observed only during the first two weeks, when they ranged from  $1 \times 10^9$  to  $5 \times 10^5\text{ Bq/m}^3$  close to the Itaorna beach spreading just to Sandri Island. After 180 days, the plume could not be detected anymore in the bay, because their activities would be lower than the minimum detectable value ( $< 11\text{ kBq/m}^3$ ).



## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>	<i>Página</i>
Figura 2.1 – Os Sistemas Gerais do CANDU 6. [CANDU 6, 2005]	23
Figura 2.2 – O Elemento Combustível. [CANDU 6, 2005]	25
Figura 2.3 – Troca do Combustível. [CANDU 6, 2005]	26
Figura 2.4 – O Gerador de Vapor. [CANDU 6, 2005]	30
Figura 2.5 – Sistema de Purificação. [CANDU 6, 2005]	31
Figura 2.6 – O ciclo do Combustível do CANDU 6. [CANDU 6, 2005]	33
Figura 2.7 – A Baía da Ilha Grande.	40
Figura 3.1 – Domínio Modelado na Baía da Ilha Grande	47
Figura 3.2 – Curva de Maré Típica de Angra dos Reis	50
Figura 3.3 – Gráfico da Série Temporal de Ventos da Estação Meteorológica da CNAAB	52
Figura 3.4 – Hidrograma de Vazões do rio Mambucaba	54
Figura 4.1 – LOCA no Sistema de Refrigeração [CANDU 6, 2005]	74
Figura 4.2 – Domínio Simulado na Baía da Ilha Grande	78
Figura 4.3 – Elipse de Correntes de Maré (C1)	79
Figura 4.4 – Elipse de Correntes de Maré (C2)	80
Figura 4.5 – Correntes Residuais eulerianas em Maré de Quadratura (C1).	81
Figura 4.6 – Correntes Residuais eulerianas em Maré de Sizígia (C1).	82
Figura 4.7 – Correntes Residuais eulerianas em Maré de Quadratura (C2).	83
Figura 4.8 – Correntes Residuais eulerianas em Maré de Sizígia (C2).	84
Figura 4.9 – Dispersão da Pluma de Trítio 1 dia Após o Acidente no Cenário 1.	91
Figura 4.10 – Dispersão da Pluma de Trítio 1 dia Após o Acidente no Cenário 2.	91
Figura 4.11 – Dispersão da Pluma de Trítio 3 dias Após o Acidente no Cenário 1.	92

Figura 4.12 – Dispersão da Pluma de Trítio 3 dias Após o Acidente no Cenário 2.	92
Figura 4.13 – Dispersão da Pluma de Trítio 7 dia Após o Acidente no Cenário 1.	93
Figura 4.14 – Dispersão da Pluma de Trítio 7 dias Após o Acidente no Cenário 2.	93
Figura 4.15 – Dispersão da Pluma de Trítio 14 dias Após o Acidente no Cenário 1.	94
Figura 4.16 – Dispersão da Pluma de Trítio 14 dias Após o Acidente no Cenário 2.	94
Figura 4.17 – Dispersão da Pluma de Trítio 30 dias Após o Acidente.	95
Figura 4.18 – Dispersão da Pluma de Trítio 60 dias Após o Acidente.	97
Figura 4.19 – Dispersão da Pluma de Trítio 90 dias Após o Acidente.	97
Figura 4.20 – Dispersão da Pluma de Trítio 120 dias Após o Acidente.	98
Figura 4.21 – Dispersão da Pluma de Trítio 180 dias Após o Acidente.	98
Figura 4.22 – Dispersão da Pluma de Trítio 365 dias Após o Acidente.	99

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela</i>	<i>Página</i>
Tabela 1 – Constantes harmônicas referentes à estação maregráfica de Angra dos Reis, Baía de Ilha Grande, RJ, listadas pela significância da amplitude.	49
Tabela 2 – Valores adotadas na confecção das figuras de distribuição da concentração em atividade de trítio, com os índices de diluição associados.	87

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ENIAC: Eletronic Numeric Integrator And Calculator

BIG: Baía de Ilha Grande

CNEN: Comissão Nacional de Energia Nuclear

PWR: Pressurezed Water Reactor (Reator a Água Pressurizada)

CANDU: Canadá Deutério Urânio

MW<sub>e</sub> : Mega Watts Elétrico

<sup>3</sup>H: Trítio ou Trício

<sup>2</sup>H<sub>2</sub>O ou D<sub>2</sub>O: Água Pesada

TBq: Terabequerel

DHN: Diretoria de Hidrografia e Navegação

HT: Trítio Gasoso

HTO: Água Tritiada

FEMAR: Fundação de Estudos do Mar

DHN: Diretoria de Hidrografia e Navegação

CCCSL: Condição de Contorno Cinemática na Superfície Livre.

CCCF: Condição de Contorno Cinemática no Fundo.

CNAAA: Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto

LOCA: Loss of Coolant Accident

ECCS: Emergency Core Cooling System

COG: CANDU Owners Group

DNA: Ácido Desoxirribonucléico

C1: Cenário 1

C2: Cenário 2

## SUMÁRIO

	<i>Página</i>
1. INTRODUÇÃO	15
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	15
1.2 OBJETIVOS	17
1.3 RELEVÂNCIA DO ESTUDO	18
2. FUNDAMENTOS CONCEITUAIS	21
2.1 O CANDU 6 – VISÃO GERAL	21
2.1.1 CICLO DO COMBUSTÍVEL	31
2.2 O TRÍTIO	34
2.3 MODELAGEM AMBIENTAL	38
2.4 A BAÍA DA ILHA GRANDE	40
3. METODOLOGIA	43
3.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA BAÍA DA ILHA GRANDE	43
3.2 DADOS DE ENTRADA DO MODELO	46
3.2.1 BATIMETRIA	46
3.2.2 DADOS DE MARÉ	47
3.2.3 DADOS DE VENTO	50
3.2.4 DADOS DE VAZÃO FLUVIAL	52
3.3 MODELO HIDRODINÂMICO – 2DH	54
3.3.1 A MODELAGEM DE TENSÕES TURBULENTAS	58
3.4 MODELO EULERIANO DE TRANSPORTE ADVECTIVO-DIFUSIVO – 2DH	62
3.5 ESCOAMENTOS EM ÁGUAS RASAS E APROXIMAÇÃO HIDROSTÁTICA	66
3.6 CONDIÇÕES DE CONTORNO	68
3.6.1 CONDIÇÃO DE CONTORNO PARA O MODELO HIDRODINÂMICO	68

3.6.2 CONDIÇÃO DE CONTORNO PARA O MODELO DE TRANSPORTE EULERIANO – 2DH	69
3.7 <i>ACIDENTE COM PERDA DE REFRIGERANTE (LOSS OF COOLANT ACCIDENT – LOCA)</i>	71
4. RESULTADOS	73
4.1 CENÁRIOS SIMULADOS	73
4.2 SIMULAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO	76
4.3 RESULTADOS DO MODELO DE TRANSPORTE EULERIANO – 2DH	85
4.4 LIMITES DE RADIOPROTEÇÃO E AVALIAÇÃO DO IMPACTO	101
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	105
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A modelagem ambiental, hoje, é um instrumento presente nos estudos e projetos de engenharia, indispensável no licenciamento ambiental para avaliação do impacto de instalações industriais e sua importância cresce consideravelmente ao longo dos anos. É um meio de confrontar teorias com modelos experimentais, de prever situações e único modo consistente de interpolar e extrapolar medições, minimizando e otimizando o monitoramento de variáveis ambientais de outro modo inacessíveis. Usualmente a resolução de certos problemas demandam forte esforço de cálculo, a partir do estabelecimento de modelos matemáticos robustos ou do estabelecimento de teias de relações entre variáveis em diversas escalas de observação. Modelos matemáticos estabelecidos a partir de modelos fenomenológicos recaem em sistemas de equações diferenciais parciais ou de equações diferenciais ordinárias de elevado número de incógnitas, demandando uso de tecnologia computacional na sua solução.

Devido ao seu elevado desempenho no processamento de dados, modelos computacionais passaram a ser utilizados em centros de pesquisas do mundo todo e com as mais diversas aplicações. Nesse contexto, surgiram inúmeros programas de modelagem computacional e dentre eles está o sistema utilizado neste trabalho, o SisBaHiA<sup>®</sup> (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental). Tal modelo pode ser utilizado, entre outras análises, para diagnósticos e prognósticos em corpos de água superficiais com simulação do transporte de contaminantes (e.g. hidrocarbonetos, radionuclídeos, metais pesados) em escoamentos 2DH na horizontal (promediados na vertical) ou 3D.

Os modelos de transporte de substâncias (escalares) exigem três níveis de validação. O primeiro nível é a validação do modelo digital de terreno. Para tanto, é necessário garantir que a geometria do corpo de água implementada no sistema de modelos esteja correta, e seja condizente com a existente na época de medições de níveis e correntes. Deve-se igualmente garantir que as

escalas de discretização sejam condizentes com a do fenômeno de interesse. O segundo nível de validação é a modelagem hidrodinâmica, na qual é preciso garantir que os forçantes dos escoamentos, e.g. dados de níveis de água, ventos e vazões fluviais, estejam corretamente implementados no sistema de modelos, e sejam condizentes com os existentes na época de medição de níveis e correntes. Uma de suas aplicações é basicamente a previsão do escoamento ou movimento dos corpos d'água. Somente no terceiro nível de validação o transporte de contaminantes é verificado. Para tanto se deve garantir que a intensidade e a geometria das fontes, parâmetros das reações cinéticas e similares estejam corretamente implementados no sistema de modelos e sejam condizentes com os existentes na época de medição de cargas poluidoras. Com grande frequência esses modelos são utilizados para simulações de cenários em águas costeiras, baías, estuários, rios, reservatórios, lagos e lagoas.

Com a retomada do programa nuclear brasileiro e o crescimento mundial da energia nuclear, torna-se de grande importância simular a dispersão de radionuclídeos no meio ambiente em diferentes cenários de liberação de efluentes, através de modelos de transporte. Estes modelos produzem informações para prognóstico de situações de contingência e mitigação e definição de estratégias de ação em caso de acidentes, assim como podem prever a evolução de eventos em tempo real, o que é fundamental para planejamento de ações emergenciais. Neste trabalho foi escolhido o reator de terceira geração CANDU 6 sendo que as suas principais características estão descritas na seção 2.1. Tal escolha deve-se ao fato de que esse reator de água pesada pressurizada, devido as suas vantagens quanto ao aproveitamento de combustível queimado, é uma possível futura opção na diversificação do parque nuclear brasileiro.

O local escolhido foi a Baía de Ilha Grande onde está instalada a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), que conta com duas unidades instaladas e uma em construção, é uma região costeira de interesse no litoral do estado do Rio de Janeiro. A região está localizada próxima à capital do estado e possui grande relevância econômica. Isso facilitou a obtenção dos



dados necessários para as atividades de pré-processamento relacionadas ao modelo digital de terreno. Franklin (2001) simulou a descarga rotineira de trítio e cézio para as duas unidades do CNAAA em operação, utilizando o SisBaHiA e concluiu que a dispersão de  $^3\text{H}$  e  $^{137}\text{Cs}$  alcança equilíbrio após 50 dias, com valores de concentração inferiores ao limite de detecção da técnica empregada pelo operador. É importante salientar que a previsão da dispersão de radionuclídeos liberados acidentalmente ao mar - oriundo de usinas nucleares como Angra I e II e a futura Angra III, está dentro da capacidade técnica do modelo.

## 1.2 OBJETIVOS

1. Comparar a circulação hidrodinâmica 2DH na Baía de Ilha Grande (BIG) em dois cenários, com e sem circulação forçada pelo bombeamento e descarga de água marinha pelas usinas, levando em consideração o regime de marés, ventos, aporte fluvial, a batimetria e a rugosidade da superfície de fundo.
2. Avaliar a dispersão do trítio ( $^3\text{H}$ ) no sistema Baía de Ilha após uma liberação acidental postulada a partir de um evento de LOCA em um reator de água pesada, utilizando o modulo euleriano do SisBaHiA® para simulação de transporte 2DH advectivo-difusivo.
3. Avaliar o impacto radiológico ambiental do trítio ( $^3\text{H}$ ) nas águas da Baía de Ilha Grande através do mapeamento de áreas onde a dose excede os limites de intervenção, onde seriam necessárias ações de mitigação.

### 1.3 RELEVÂNCIA DO ESTUDO

As estrelas, compostas inicialmente de hidrogênio, conseguem formar muitos elementos químicos por meio de reações nucleares de fusão. A produção em larga escala de elementos químicos ocorre na fase de “explosão de supernova”, que algumas estrelas atingem, se suas massas forem de 4 a 8 vezes maiores que a massa do Sol. Neste evento catastrófico, de duração média de dois segundos, é sintetizada a maioria dos núcleos conhecidos [Tauhata, 2003].

Os núcleos sintetizados são dispersos no cosmos após a explosão, e se incorporam ou depositam-se em planetas, asteróides, estrelas e em demais corpos celestes, por ação gravitacional. A abundância cósmica desses elementos difere bastante de sua abundância na crosta de um planeta, pois muitos elementos não conseguem ser retidos pelo seu campo gravitacional.

Devido ao processo de captura rápida de nêutrons durante a explosão de uma supernova, a maioria dos núcleos dos elementos químicos sintetizados é instável. Em um intervalo curto de tempo muitos deles tornam-se estáveis ao emitir radiações, por terem a meia-vida curta. Pelo mecanismo de acumulação gradual, os nuclídeos de meia-vida longa podem compor, com os elementos estáveis, a crosta terrestre. O  $^{40}\text{K}$ , o  $^{238}\text{U}$  e o  $^{232}\text{Th}$  contribuem, juntamente com os radionuclídeos originados pelo seus decaimentos e os cosmogênicos, para a radioatividade natural da crosta terrestre [Tauhata, 2003].

Os raios cósmicos são partículas altamente energéticas, principalmente prótons, elétrons, nêutrons, mésons, neutrinos, núcleos leves e radiações gama provenientes do cosmos. A energia dessas radiações é da ordem de MeV a GeV, e muitas são freadas pela atmosfera ou desviadas pelo cinturão magnético de Van Allen. Na superfície terrestre podemos detectar, na maioria, partículas secundárias, criadas a partir de colisões com os núcleos da atmosfera.

A atmosfera funciona como uma blindagem, atenuando e absorvendo bastante os raios cósmicos e radiações secundárias. A quantidade de radiação

aumenta com a altitude e latitude, ou seja, as pessoas que habitam as montanhas recebem mais radiação que as que vivem ao nível do mar, e os habitantes de regiões próximas aos pólos são mais expostos que os da região equatorial.

Alguns dos resultados do bombardeio constante da atmosfera superior pelos raios cósmicos, principalmente nêutrons, é a produção dos denominados radionuclídeos cosmogênicos:  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{22}\text{Na}$  e  $^{85}\text{Kr}$ . Como quase todos os organismos vivos têm grande quantidade de carbono e hidrogênio, logo um pequeno percentual é radioativo [Tauhata, 2003].

Esses radionuclídeos cosmogênicos chegam à crosta terrestre basicamente por três vias [IAEA, 1999]:

- a. Dissolvidos na água da chuva;
- b. Participando, em alguns casos, de reações em equilíbrio com a água ou com outros materiais na superfície da terra;
- c. Absorvidos por partículas que se depositam na crosta terrestre.

Considerando os fatores citados acima temos que o  $^{40}\text{K}$  é o responsável por 97,3% da radioatividade encontrada no mar, onde sua concentração no oceano é de aproximadamente 11,8 Bq/kg. Outros nuclídeos também são encontrados em águas marinhas: são os da série do  $^{238}\text{U}$ , com 1,8%, e o  $^{87}\text{Rb}$ , com 0,9% do inventário marinho [Chih-An Huh, 2004].

Entre os anos de 1946 e 1993 os EUA depositaram uma quantidade significativa de material radioativo no mar. Dentre esses rejeitos estavam vasos de reatores nucleares, combustível nuclear utilizado, rejeitos líquidos e sólidos. Esses rejeitos foram dispostos nos oceanos Atlântico, Pacífico e Ártico. Acredita-se que apenas no oceano Ártico tenham sido depositados  $87 \times 10^{15}$  Bq [IAEA, 1999].

Pode ocorrer, também, a entrada de materiais radioativos no mar por outras fontes, como pela reentrada de satélites que utilizam material radioativo

como fonte de energia, com o afundamento de um submarino nuclear, com a perda de fontes radioativas, etc.

O incremento de radionuclídeos no meio ambiente está intimamente ligado à ação humana, e deu-se início em 1944 com a liberação da água de refrigeração do reator Hanford. Em 1945, os EUA começaram a testar artefatos nucleares. A partir de 1946 começaram testes em meio marinho. Com isso, estima-se que a atividade vinda de radionuclídeos artificiais nos oceanos seja da ordem de  $10^{20}$  Bq, sendo que o trítio é responsável por 99% dessa atividade [IAEA, 1999].

De 1944 aos dias atuais, o número de reatores aumentou drasticamente. Em 1996, existiam cerca de 440 reatores em operação, gerando a maior liberação de radionuclídeos no mar até então. Entretanto dados publicados pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA – sigla em inglês) indicam que a ocorrência de materiais radioativos naturais nos oceanos continua sendo a contribuição mais significativa para a dose de radiação em seres humanos.

Segundo a Agência Internacional de Energia Atômica (1999), há cinco fontes artificiais de radionuclídeos para ambientes marinhos, a saber:

1. Liberações controladas de efluentes líquidos radioativos de baixo nível;
2. Liberação de elementos radioativos provenientes de testes com armamentos nucleares, na atmosfera e superfície;
3. Liberações acidentais de instalações nucleares;
4. Perdas de materiais radioativos no mar;
5. Disposição no mar de rejeitos radioativos.

No Brasil existem duas centrais nucleares, conhecidas como Angra 1 e Angra 2, e atualmente uma nova unidade nuclear encontra-se em construção (Angra 3). Essas duas unidades existentes geram eletricidade para o Estado do

Rio de Janeiro e têm capacidade para gerar 657 MW<sub>e</sub> (Angra 1), 1309 MW<sub>e</sub> (Angra 2) e posteriormente 1309 MW<sub>e</sub> (Angra 3). Os dois reatores em funcionamento são do tipo PWR (Pressurized Water Reactor – em inglês) e usam a água leve como moderador. A nova central em construção irá dispor do mesmo reator que opera na unidade 2.

Há liberações de líquidos para o meio ambiente (mar) que são rotineiras e visam descartar parte da água do sistema de refrigeração do reator, composta pela água do mar que deve ser continuamente renovada. Além disso eventuais vazamentos do sistema e os efluentes de tratamento ficam estocados, sendo liberados em conjunto com a descarga de água do mar, somente se as concentrações de poluentes radioativos estiverem abaixo do limite estipulado no licenciamento.

A liberação de rejeitos líquidos da CNAAA acontece em um das enseadas da Baía da Ribeira (Saco de Piraquara de Fora) na Baía de Ilha Grande. A respeito dos efluentes radioativos, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) é a responsável por fiscalizar se esses rejeitos estão sendo liberados de acordo com as especificações técnicas previstas no relatório final de análise de segurança (FSAR, 1999).

No entanto, para simular o transporte dos poluentes radioativos, e.g. trítio, no ambiente marinho, é necessária a caracterização da circulação hidrodinâmica na área de interesse, no caso a Baía de Ilha Grande (BIG).

## **2. FUNDAMENTOS CONCEITUAIS**

### **2.1 O CANDU 6 – VISÃO GERAL**

As centrais nucleares do tipo CANDU (Canadá Deutério Urânio) utilizam um reator à base de água pesada ( $^2\text{H}_2\text{O}$ ) pressurizada. Esses reatores foram projetados no final da década de 1950, mas somente foram patenteados na década de 1960.

O CANDU 6 faz parte da terceira geração de reatores (III+) e podem gerar cerca de 740 MW<sub>e</sub>. Essas unidades são projetadas para uma vida útil de mais de cinquenta anos. As plantas são capazes de operar, na média anual, com mais de 90% de sua potência [CANDU 6, 2005].

O processo de geração de vapor no CANDU 6, para produção de energia, começa como em qualquer outro reator nuclear - com a fissão controlada do <sup>235</sup>U. No entanto, ao contrário de outros reatores, o CANDU 6 é abastecido com combustível de urânio natural, o qual é distribuído entre os 380 canais de combustível. Cada canal de combustível tem de seis metros de comprimento e contém 12 elementos combustíveis [CANDU 6, 2005].

Os elementos combustíveis são alojados em um tanque cilíndrico na horizontal que contém água pesada (<sup>2</sup>H<sub>2</sub>O) como moderadora a baixa pressão. Existe um sistema de abastecimento mecânico que pode ser usado para remover um elemento combustível com defeito enquanto o reator está em operação. O CANDU 6 tem sistemas para identificar e localizar o combustível defeituoso.

A água pesada pressurizada é utilizada como moderador e refrigerante. A água pesada utilizada como moderador está em um sistema separado da utilizada como refrigerante, havendo dois circuitos fechados. O calor produzido na fissão do combustível é transferido para o refrigerante (D<sub>2</sub>O), que flui em alta pressão através dos canais onde ficam os elementos combustíveis. Os canais de combustível atravessam o reator. O refrigerante transfere o calor para os geradores de vapor, onde o mesmo é transferido para a água leve (H<sub>2</sub>O) para produzir vapor. O vapor, por sua vez, é usado para acionar a turbina que movimenta um gerador para produzir eletricidade. O refrigerante, quando deixa os geradores de vapor, retorna para a entrada dos canais de combustível.

Na Figura 2.1 podemos observar os sistemas gerais de um reator do tipo CANDU 6.

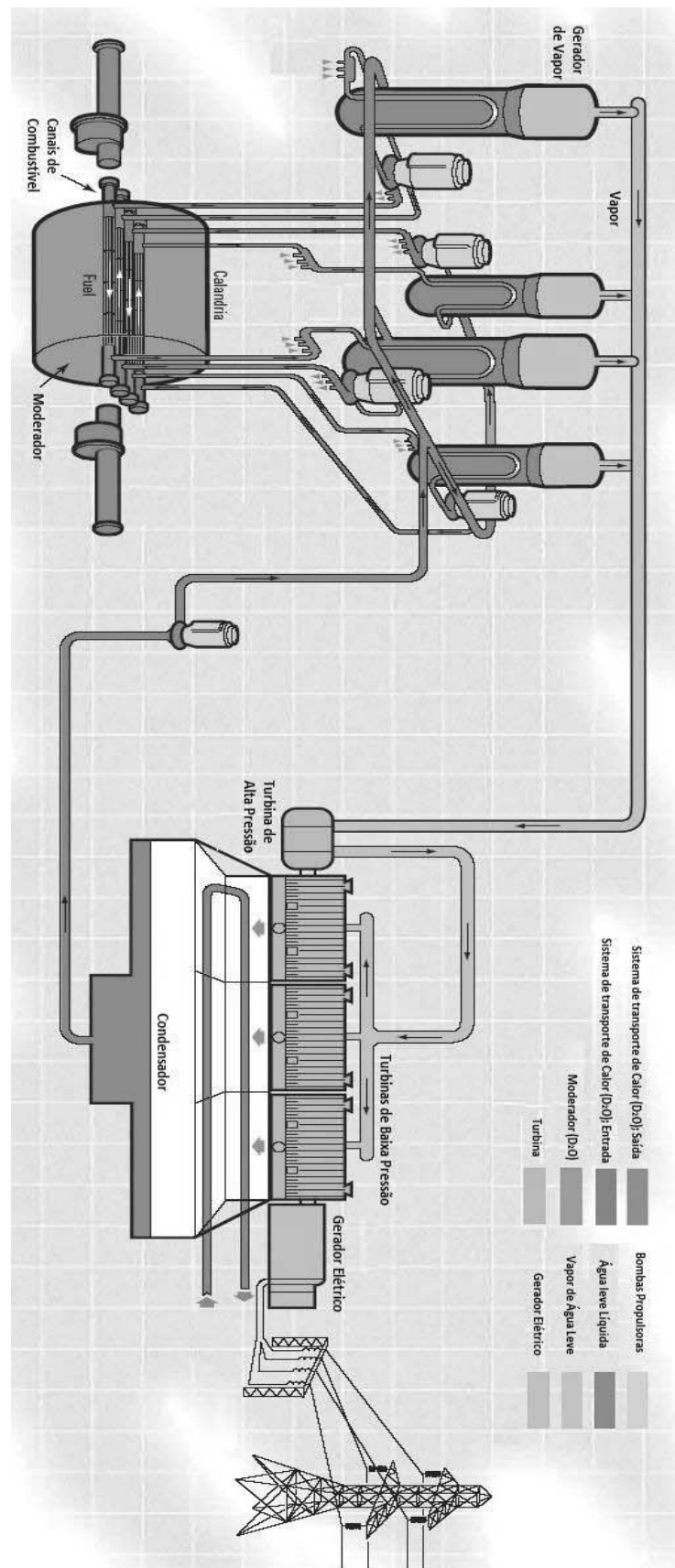


Figura 2.1 – Os Sistemas Gerais do CANDU 6 [CANDU 6, 2005].

O reator é composto por um cilindro de aço inox horizontal (calandria), fechado em cada extremidade, que suporta os canais de combustível na horizontal e ajudam o reator a fornecer parte da blindagem pessoal. O reator está alojado em uma estrutura de aço revestida de concreto (a abóbada do reator), que prevê blindagem térmica. O reator contém água pesada a baixa temperatura e pressão, mecanismos de controle de reatividade e várias centenas de canais de combustível.

O conjunto do reator inclui um canal de combustível de zircônio-nióbio, a calandria de zircônio, tubos de aço inoxidável em cada extremidade do canal de combustível e quatro espaçadores que mantêm a separação entre o tubo de pressão e a calandria. Cada canal de combustível está a 12,9 MPa e isolado termicamente do moderador a baixa pressão. Para isso, é colocado um tubo concêntrico ao canal de combustível, construído de aço inox, o qual é preenchido de gás CO<sub>2</sub>.

O refrigerante (água pesada) pressurizado flui ao redor e através do combustível no canal de combustível e remove o calor gerado pela fissão nuclear. O fluxo de refrigerante através dos canais adjacentes no reator são em direções opostas.

A Figura seguinte, 2.2, mostra o elemento combustível do CANDU 6 que consiste de 37 varetas, dispostos em anéis circulares. Cada elemento é composto de urânio natural na forma de pastilhas cilíndricas de dióxido de urânio sintetizado, contido em um invólucro fechado de zircaloy (varetas). As 37 varetas são mantidas juntas por placas no final e em cada extremidade para formar o elemento combustível. Espaçadores soldados à vareta de combustível garantem a separação necessária. Para apoiar o elemento combustível no canal são soldados espaçadores à superfície externa [CANDU 6, 2005].





Figura 2.2 – O Elemento Combustível [CANDU 6, 2005].

A mudança de combustível é baseada na utilização combinada de duas máquinas de combustível controladas remotamente. Cada máquina de combustível está em uma extremidade do canal de combustível. A primeira máquina insere um novo elemento combustível no canal, na mesma direção do fluxo de refrigerante. Essa operação desloca o elemento combustível irradiado, que é recebido pela segunda máquina de abastecimento, no final do canal de combustível. Normalmente, quatro ou oito dos 12 elementos combustível são substituídos durante o reabastecimento, que é realizado a qualquer momento, mesmo com o reator em operação. Para CANDU 6, cerca de 10 canais de combustível são reabastecidos por semana.

Toda a operação é dirigida a partir da sala de controle através de um sistema informatizado. O sistema de controle fornece um registro de todas as operações e autorizações para a intervenção manual do operado, se necessário.

O novo combustível é recebido no compartimento de armazenamento de combustível. Este compartimento suporta o inventário de seis meses de elementos combustíveis e pode armazenar temporariamente todo o combustível necessário para os primeiros carregamentos. Quando necessário, os elementos combustíveis são transferidos para a nova sala de transferência no edifício do reator. Os elementos combustíveis irradiados são colocados no porto de descarga pelas máquinas e então um elevador coloca-os em uma piscina cheia de água leve. O combustível irradiado é então transmitido

debaixo da água através de um canal de transferência em um compartimento de recepção, onde é armazenado em bandejas ou cestos dentro do compartimento de armazenamento.

A Figura 2.3 mostra a descarga e operações de transferência que são controladas remotamente pelos funcionários da central nuclear. As operações no compartimento de armazenamento são realizadas sob a água, utilizando ferramentas especiais e auxiliadas por guindastes e guinchos. Antes da transferência de elementos combustíveis defeituosos para a baía, esses são inseridos em um latão lacrado para eliminar a propagação da contaminação. O volume de armazenamento nas piscinas corresponde a uma capacidade mínima de 7 anos de combustível irradiado. Os combustíveis novos ou irradiados do CANDU 6 não conseguem alcançar a criticalidade no ar ou na água leve, independente da configuração de armazenamento.

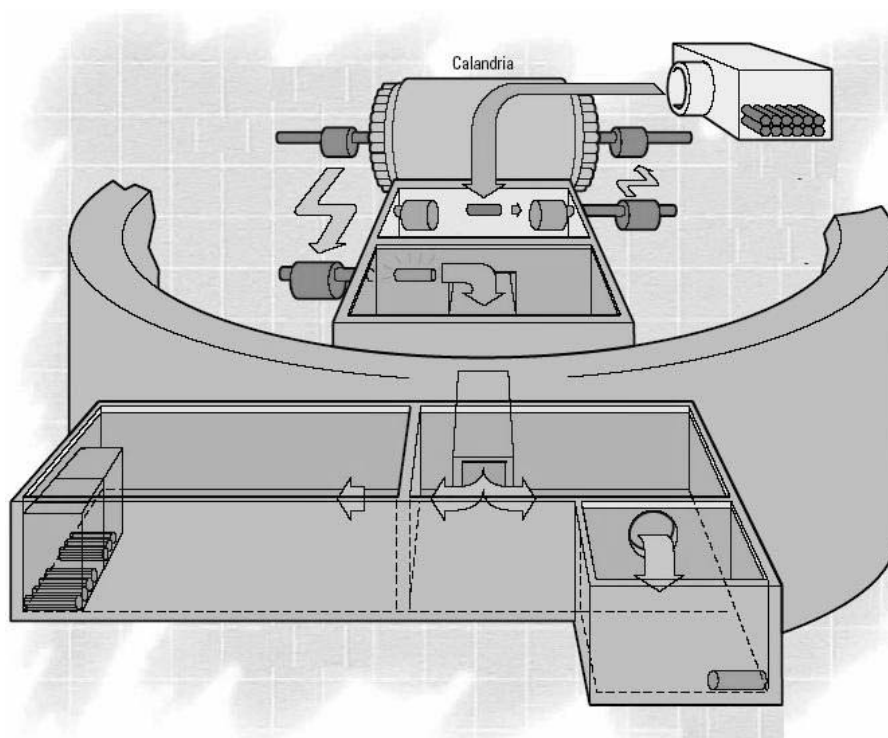


Figura 2.3 – Troca do Combustível [CANDU 6, 2005].

Dentro do reator é usado o gás hélio como cobertura para o sistema de moderação, pois é um gás quimicamente inerte e não é ativado pela irradiação

com nêutrons. A radiólise da água pesada na calandria resulta na produção de gases de deutério e oxigênio, e esses gases recombina-se para formar água pesada. As concentrações de gás deutério e oxigênio são mantidos baixos devido ao risco de explosão.

O sistema de purificação do moderador é responsável pela pureza de D<sub>2</sub>O, minimizando a radiólise, que pode causar uma produção excessiva de deutério no gás de cobertura. Esse sistema minimiza a corrosão dos componentes, eliminando impurezas presentes no D<sub>2</sub>O e controlando o pH do moderador. Sob o comando do operador, pode-se diminuir a concentração do boro solúvel e gadolínio, em resposta às demandas de reatividade.

O sistema de amostragem permite que sejam retiradas amostras a partir do sistema de coleta do D<sub>2</sub>O, do sistema de purificação do moderador, do sistema de limpeza do D<sub>2</sub>O e do sistema principal. Com essas amostras é possível determinar [CANDU 6, 2005]:

- pH;
- condutividade;
- concentração de cloretos;
- pureza isotópica;
- boro e concentração de gadolínio;
- teor de trítio;
- teor de fluoretos;
- teor de orgânicos.

O controle de pressão na tubulação é realizado no pressurizador, que tem aquecedores elétricos que ajudam a pressurizar o volume com vapor acima do líquido. O volume do espaço de vapor é projetado para amortecer

transientes de pressão, sem permitir que pressões excessivamente altas ou baixas prejudiquem o sistema de transporte de calor.

O pressurizador também acomoda a mudança no volume do líquido de refrigeração do reator. Este procedimento permite que a potência do reator, ao ser aumentada ou diminuída rapidamente, cause uma demanda grave na alimentação do D<sub>2</sub>O, havendo, conseqüentemente, prejuízos aos componentes do sistema.

A pressão é controlada pelo pressurizador. O calor pode ser adicionado através dos aquecedores elétricos, para aumentar a pressão. O calor é removido do pressurizador via *spray* de D<sub>2</sub>O, que condensa o vapor para reduzir a pressão. O inventário de refrigerante é ajustado pelo circuito do pressurizador (aquecedores e *spray*).

No desligamento do reator, o sistema de arrefecimento consegue rapidamente baixar a temperatura até 54 °C e manter o sistema nesta temperatura por tempo indeterminado. Para isso, esse sistema é constituído por dois circuitos independentes, cada um localizado em uma extremidade do reator. Cada circuito é composto por uma bomba e um trocador de calor, conectado entre a entrada e a saída para os geradores de vapor.

Para um resfriamento normal, continua-se gerando vapor e condensando o refrigerante, e assim consegue-se reduzir a temperatura do sistema de refrigeração para 177 °C em aproximadamente 30 minutos. Para resfriar de 177 °C a 77 °C, as válvulas de isolamento no reator são abertas e todas as bombas são mantidas em funcionamento. Quando a 77 °C, as bombas de transporte de calor do núcleo são desligadas e o desligamento do sistema passa para as bombas de refrigeração. O sistema é então resfriado a 54 °C.

A água (H<sub>2</sub>O) de alimentação das turbinas que passa pelos geradores de vapor é fornecida separadamente para cada gerador de vapor. Existe uma válvula de retenção na linha de alimentação da água para cada gerador de vapor, que tem a função de evitar o refluxo no evento improvável de falha de alimentação da água.

A química da água de alimentação dos geradores de vapor é precisamente controlada pela desmineralização, desaeração, limpeza de oxigênio e controle de pH. Há um sistema de descarga em cada gerador de vapor que permite que as impurezas coletadas sejam removidas, a fim de evitar a sua acumulação, que em longo prazo causam efeitos corrosivos.

O sistema de arrefecimento do reator (refrigerante –  $D_2O$ ) flui através de pequenos tubos que saem dos canais de combustível e vão até o gerador de vapor. Dentro dos geradores de vapor há centenas de tubos em  $\cap$  na vertical que transferem o calor da água pesada para a água leve que, circulada no exterior dos tubos, que produzem vapor. A umidade é removida por um equipamento localizado na seção superior do gerador de vapor e que faz a separação entre vapor e umidade; assim, o vapor seco flui pelos tubos através da parede da contenção do reator até chegar à turbina de alta pressão.

Os vapores produzidos nos geradores de vapor entram na turbina de alta pressão e aumentam o seu teor de água, pois se expandem perdendo sua pressão primária. Ao deixar esta etapa, o vapor passa por separadores, onde a água é removida. Ela passa então através de reaquecedores, onde é aquecido pelo vapor tomado diretamente da rede de vapor. O vapor reaquecido então passa através das turbinas de baixa pressão, indo para o condensador, onde se condensa. A água é depois devolvida para os geradores de vapor através do sistema de aquecimento.

A Figura 2.4 mostra um gerador de vapor utilizado em centrais nucleares que têm reator do tipo CANDU 6.

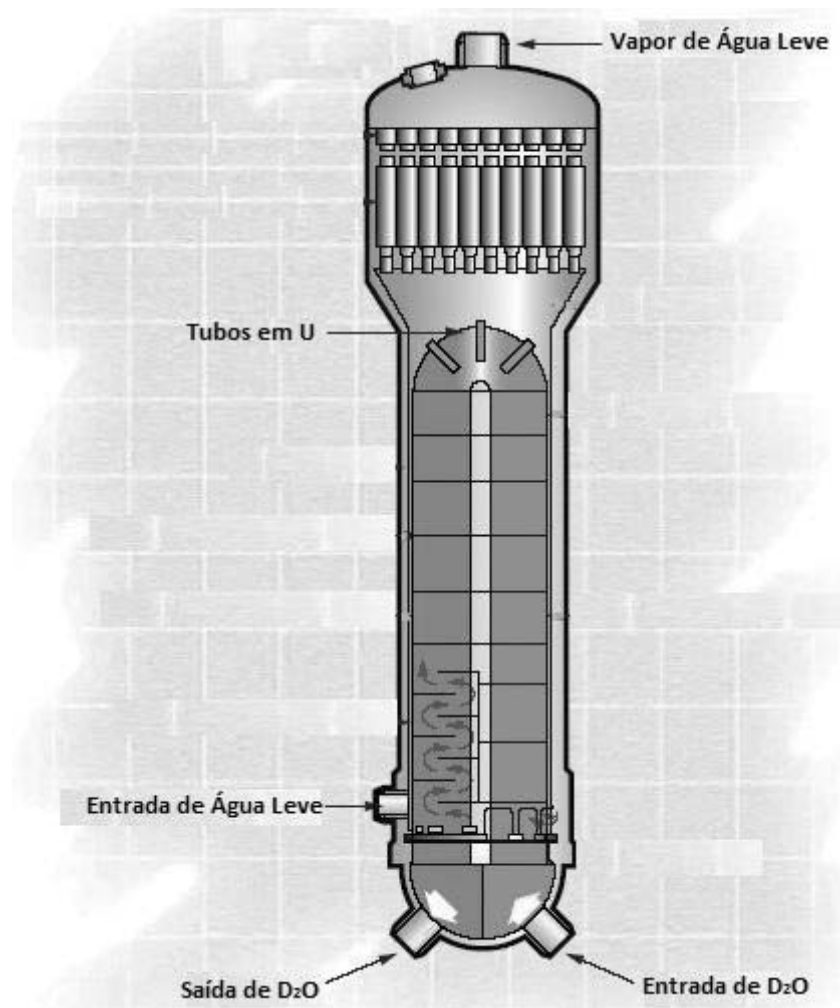


Figura 2.4 – O Gerador de Vapor [CANDU 6, 2005].

O sistema de purificação do D<sub>2</sub>O coletado na estação elimina a maior parte das impurezas. Esse sistema contém três colunas de troca iônica, um filtro de carvão e duas bombas de alimentação. As colunas de troca iônica removem o lítio, ferro e íons de boro e outros produtos de corrosão. As colunas também retiram produtos de fissão que podem estar presentes. O filtro de carvão remove qualquer óleo presente na água pesada, bem como impurezas como aminas e carbonatos.

O sistema de coleta foi concebido para recolher D<sub>2</sub>O que vaza de componentes mecânicos, que podem ocorrer em qualquer área do edifício do reator, e receber D<sub>2</sub>O drenado do direto do equipamento.

O sistema de abastecimento recebe D<sub>2</sub>O fresco basicamente de caminhões-tanque ou tambores. Os quatro tanques de armazenamento do sistema de abastecimento de D<sub>2</sub>O têm capacidade para o reator ou para o sistema de refrigeração. Os quatro tanques também agem como armazenamento de isótopos de D<sub>2</sub>O durante a operação normal do reator.

Na Figura 2.5 está exemplificado o sistema de purificação de um reator do Tipo CANDU 6.

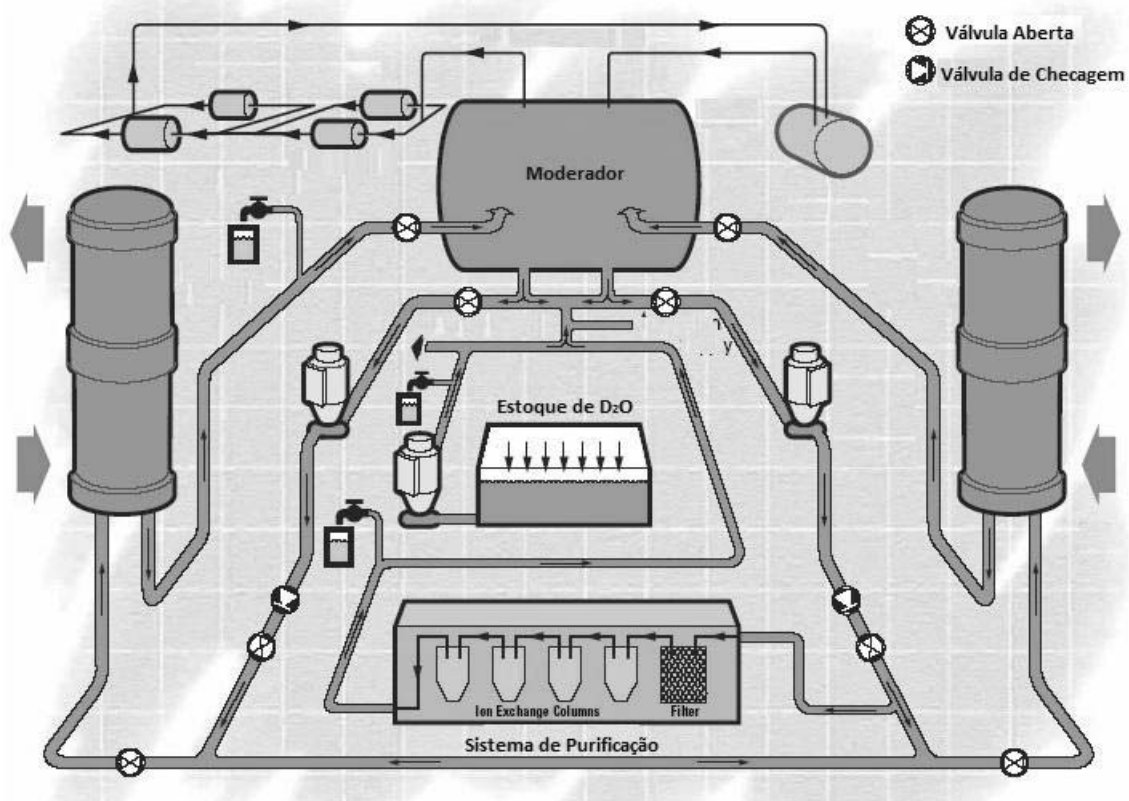


Figura 2.5 – Sistema de Purificação [CANDU 6, 2005].

### 2.1.1 CICLO DO COMBUSTÍVEL

A alta economia de nêutrons é uma característica do reator CANDU 6, que o permite operar com uma variedade de combustíveis com baixo teor de material físsil. Vários ciclos de combustível são possíveis. Estes incluem o

urânio natural e urânio levemente enriquecido. Esta característica do CANDU 6 proporciona uma sinergia única entre o CANDU 6 e os reatores a água leve (LWR).

Como alternativa, o urânio recuperado de um LWR combustível pode ser usado em CANDU 6, sem o plutônio. Para a utilização do plutônio é necessário o reprocessamento do combustível vindo de um LWR. Além de queimar os rejeitos radioativos vindos de outras centrais nucleares, esse reator pode operar como um CANDU LWR, com combustível irradiado, reprocessado e refabricado. Esse processo atende ao conceito de não proliferação, pois é fácil proteger-se contra o desvio de material fissil.

A opção de combustível reprocessado do LWR no CANDU leva a um maior aproveitamento da produção, gerando de 30% a 40% a mais, se comparado com o reprocessamento do LWR sozinho. Além disso, a reciclagem de plutônio é limitada pela capacidade de mudanças na dinâmica do reator, o que não acontece com o CANDU 6 [CANDU 6, 2005].

A grande economia de nêutrons pelo CANDU 6 também implicam na disposição de resíduos; em particular, na redução da toxicidade dos combustíveis irradiados. Não há material cindível suficiente na mistura de plutônio e actinídeos superiores (um subproduto do reprocessamento de combustível irradiado do LWR) para ser usado como combustível no CANDU 6. Sendo assim, é necessária a adição de urânio.

O conteúdo cindível da mistura transurânica esgota-se rapidamente devido à falta de produção do plutônio. Como resultado, o fluxo de nêutrons aumenta rapidamente, a fim de manter a potência do reator no nível normal. O alto fluxo de nêutrons é fundamental para transmutar e aniquilar os actinídeos. O CANDU pode, portanto, produzir energia através da destruição dos resíduos de outros reatores nucleares sem produzir quaisquer resíduos no processo, e se enquadra na categoria de "tecnologia verde".

Uma característica importante da versatilidade do CANDU são os ciclos de combustível alternativos, que podem ser implementados com o CANDU 6 em funcionamento, com pouca mudança do equipamento. Como resultado, os



benefícios do ciclo do combustível não exigem um grande investimento em novos projetos. Esta versatilidade permite também a "reversibilidade" das opções do ciclo do combustível. Mesmo se um CANDU foi otimizado para um ciclo de combustível, o operador pode converter para um ciclo de combustível alternativo, se necessário. Isto é o chamado ciclo de combustível avançado, uma vez que preserva a opção da independência de abastecimento do enriquecimento, mesmo durante o uso do combustível avançado.

A Figura 2.6 mostra a capacidade do CANDU 6 de mudar para combustíveis nucleares alternativos, que se tornam disponíveis no mercado global, permite ao CANDU 6 aproveitar a disponibilidade mundial do combustível nuclear, reduzindo custos e proporcionando maior segurança no abastecimento do combustível.

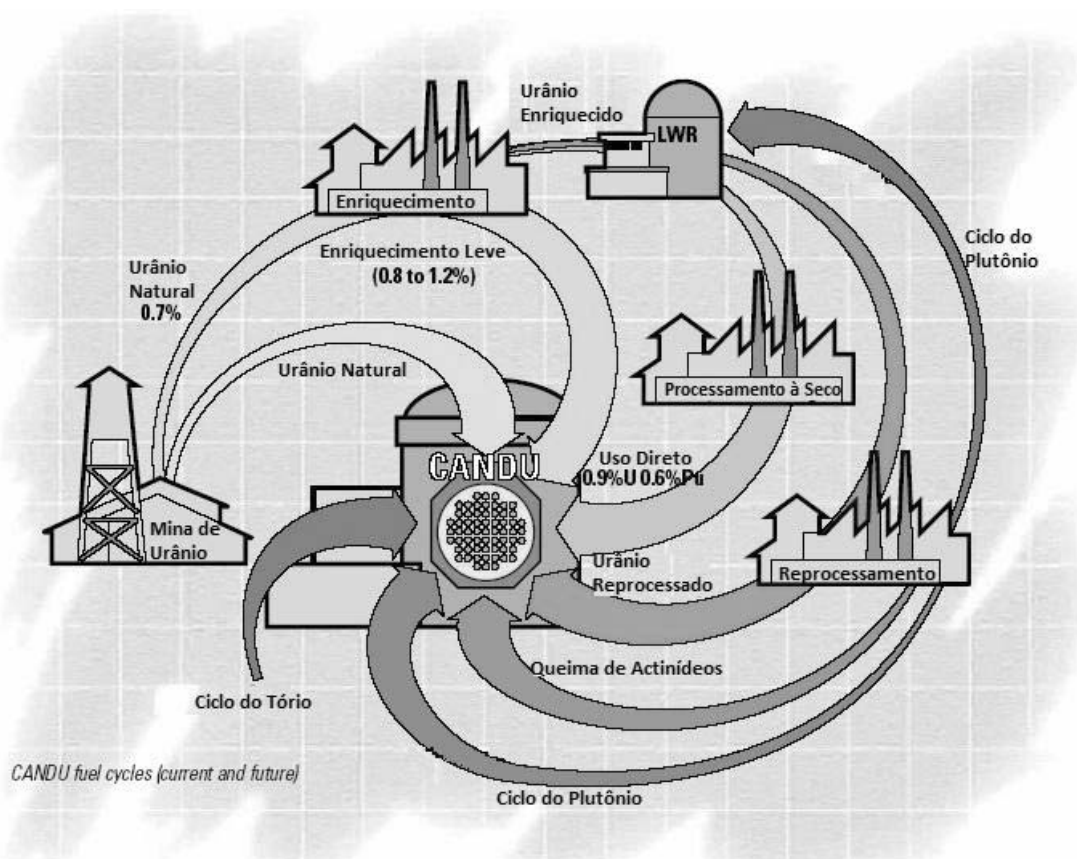


Figura 2.6 – O Ciclo do Combustível do CANDU 6 [CANDU 6, 2005].

## 2.2 O TRÍTIO

Vários são os radionuclídeos que temos como produto do processo que leva à fissão nuclear. Dentre eles, o trítio é um dos elementos gerados pelas usinas nucleares que apresenta uma das maiores taxas de liberação, principalmente em um reator do tipo CANDU, que chega a descartar no meio ambiente vinte vezes mais trítio que um LWR. Em um reator do tipo CANDU são criados grandes quantidades de trítio, pois o deutério do moderador tem uma grande seção de choque de absorção de nêutrons térmicos. Assim quase toda a água pesada ( $^2\text{H}_2\text{O}$ ) se transforma em água tritiada ( $^3\text{H}_2\text{O}$ ).

O trítio é utilizado como radiotraçador sendo solúvel em massas de água e tendo comportamento conservativo em uma coluna de água. O trítio ou trício - do latim *tritium* - é um dos isótopos do hidrogênio ( $^3\text{H}$ ) e é o menos abundante. Seu núcleo contém 1 próton e 2 nêutrons. É um isótopo radioativo com meia-vida de  $12,262 \pm 0,004$  anos. Ele decai emitindo radiação  $\beta^-$ , transmutando-se no  $^3\text{He}$  (hélio). A partícula beta emitida pelo trítio tem uma energia máxima de 18,6 keV (energia média de 5,7 keV), tem um livre caminho médio de poucos centímetros no ar, 0,9 micrômetros em água e cerca de 0,6  $\mu\text{m}$  no tecido. Isso significa que o trítio não é perigoso externamente, mas é um perigo como contaminação interna, inalado, ingerido ou através dos alimentos ou água, ou absorvidas através da pele [Fairlie, 2007].

O trítio é formado naturalmente na alta atmosfera por raios cósmicos. A quantidade de trítio, portanto, produzida a cada ano, é de aproximadamente  $7,4 \times 10^4$  TBq. Nos países desenvolvidos, no início de 1980, os montantes anuais lançados pelas usinas nucleares e instalações de reprocessamento foram da mesma ordem de grandeza da produção natural. Desde então, os valores têm aumentado, excedendo a produção de trítio natural.

Além disso, quantidades muito maiores de trítio foram liberadas nas atividades militares. Entre 1954 e 1964, testes atmosféricos de artefatos nucleares lançaram cerca de  $1,6 \times 10^8$  TBq de trítio. Quase todos os testes foram no hemisfério norte. Além disso, no auge da Guerra Fria, entre os anos

de 1970 a 1980, as descargas anuais de trítio como subproduto da fabricação de armas nucleares chegou a  $2,8 \times 10^6$  TBq [Fairlie, 2007].

O trítio é descarregado de duas formas: em sua forma elementar (HT) - como um invisível e inodoro gás, quimicamente idêntico ao gás hidrogênio – ou na forma aquosa (ou seja, a água tritiada, ou HTO) – na qual é praticamente indistinguível da água comum. A liberação de trítio por usinas nucleares no meio ambiente são feitos de ambas as formas, i.e. HTO e HT.

Ambas as formas de trítio são radioativas. Um grama do trítio gasoso (HT) contém cerca de 360 terabequerels (TBq), e um grama de água tritiada (HTO) contém cerca de 55 TBq. Ambas as formas de trítio são difundidas facilmente; o HT permeia a maioria dos materiais de borracha e muitos tipos de aço com relativa facilidade, e o HTO é química e fisicamente idêntico à água natural e, devido a isso, mistura-se rapidamente à hidrosfera, biosfera e litosfera [Fairlie, 2007].

O trítio também troca-se facilmente com o hidrogênio comum da água, sendo assim assimilado em organismos vivos, formando o trítio organicamente ligado (OBT – sigla em inglês). Tais moléculas contendo trítio apresentam-se em duas formas biogeoquímicas: i) a trocável que pode ser extraída por liofilização, sendo mais facilmente eliminada por troca iônica e ii) a não trocável que só pode ser extraída por reações químicas e representa a fração persistente do trítio orgânico.

O trítio é um radionuclídeo “fraco”, pois a energia da partícula beta (elétron) emitida no seu decaimento é muito baixa, porém quando na forma orgânica persistente o trítio pode, como a maioria dos radionuclídeos, tornar-se cancerígeno, mutagênico e teratogênico.

Trítio entra na composição do organismo em duas formas básicas: água tritiada (HTO) e compostos organicamente vinculados (OBT). Neste último, o trítio pode ser ligado ao nitrogênio, fósforo e enxofre, pois a ligação entre esses elementos e o hidrogênio é fraca e o trítio pode ser trocado facilmente na fase aquosa. Quando as moléculas orgânicas contêm trítio, a molécula é estável e apenas reações enzimáticas podem destruí-la. Essas moléculas são chamadas

genericamente como não-trocadoras de OBT e sua meia vida é muito maior do que na forma normal.

O OBT pode ser formado pela troca com o HTO e pelas reações enzimáticas, mas a maioria do OBT é encontrada nos alimentos. Uma vez ingerido, o OBT do alimento é parcialmente catabolizado e o HTO é transformado em OBT no corpo. Devido a esta complexa cinética, devemos mensurar o consumo médio de HTO e OBT e sua inserção nos alimentos OBT, HTO corporal e OBT corporal. Devido ao alto coeficiente de dose de ingestão de OBT e HTO, devemos considerar separadamente as duas formas em qualquer animal [R. Heling, 2002].

Sendo o trítio um isótopo radioativo do hidrogênio, que é metabolizado organicamente, é importante saber a atividade específica deste elemento em uma massa. Desta forma, definimos a  $A_s$  como sendo a razão entre a atividade de trítio e a massa de hidrogênio em uma amostra. Nos mamíferos, existem algumas proporções definidas entre as atividades específicas no corpo e a de ingestão de alimentos e água. A taxa de atividade específica ( $TA_s$ ) entre o trítio no corpo e meio ambiente ou alimentos é uma quantidade importante a ser considerada [R. Heling, 2002].

Para o fitoplâncton, o equilíbrio entre a água celular e a água tritiada (HTO) vinda do meio ambiente é um processo rápido. Metade da captação ocorre em 30 segundos e o restante ocorre entre 2 e 20 minutos. Podemos considerar que HTO no interior da célula está em equilíbrio com HTO fora. Não encontramos experiências sobre a dinâmica do equilíbrio de HTO para o zooplâncton, mas considerando as taxas de captação de água do zooplâncton e a massa média de menos de um micrograma, deduzimos que o equilíbrio de HTO é alcançado em alguns minutos [R. Heling, 2002].

Para os moluscos, é mostrado que a água corporal total se equilibra com o HTO em menos de seis horas, mas na verdade cerca de 80% da água corporal (extracelular) se equilibra em poucos minutos. Para crustáceos, a água corporal se equilibra com o HTO em menos de um dia.

A rápida absorção e eliminação de trítio na forma de HTO foi demonstrada para o bagre (*Ictalurus punctatus*) e “bluegill” (*Lepomis macrochirus*), com equilíbrio total entre 30 e 90 minutos. Quando se retira o dourado de um lago contaminado, o HTO tem uma meia-vida de 12 minutos, eliminando até 96% do HTO; o restante é eliminado com meia-vida de 54 minutos [R. Heling, 2002].

A partir desta análise de dados experimentais, observamos que o equilíbrio do HTO no tecido com a água é um processo rápido, com meia-vida de minutos a algumas horas. Assim, podemos supor que os tecidos com HTO estão em "equilíbrio" instantâneo com o meio (água doce ou salgada).

Os limites de liberação são quantidades de um isótopo cuja descarga somado a quaisquer outras fontes de radiação deverá resultar no limite de uma dose de público que é um millisievert (mSv) por ano e não pode ser ultrapassado. Desta forma a CNEN limitou para a CNAAA o descarte que gere uma dose efetiva máxima de 0,3 mSv por ano. A dose é estimada utilizando modelos computacionais para o transporte ambiental de núclídeos e consumo em humanos. O limite aplica-se à soma de todas as exposições do público em situações planejadas ou práticas [Fairlie, 2007].

Além disso, as centrais nucleares definem as metas operacionais, que são uma porcentagem da liberação derivada dos limites. No caso das centrais PWR da CNAAA em Angra dos Reis, esse valor operacional é da ordem de 2 Bq/m<sup>3</sup> de HTO no efluente liberado na Baía de Ilha Grande, o que produz uma descarga anual de dezenas a centenas de TBq. Por outro lado, as centrais nucleares com reatores do tipo CANDU 6 liberam na faixa de centenas de milhares de TBq de HTO por ano.

## 2.3 MODELAGEM AMBIENTAL

A modelagem matemática é o tipo mais comum de representação de processos físicos, químicos ou biológicos, mediante a um conjunto de equações capazes de descrever adequadamente um determinado conceito (modelo conceptual) sobre um fenômeno de interesse. É uma das mais importantes ferramentas preditivas aplicadas atualmente para estudar a dispersão de poluentes e a hidrodinâmica em meios fluidos.

A hidrodinâmica da maioria de corpos aquáticos naturais é extremamente complexa por sua forma geométrica irregular e pela diversidade dos fenômenos que geram o escoamento. Dentre os principais forçantes estão a ação dos ventos, vazões fluviais, marés e densidade.

Para se obter os dados é necessária a realização de medidas *in loco* sobre as variações de nível da água, velocidade e direção do vento, correntes marinhas, temperatura e salinidade, pois esses dados ajudam compreensão dos processos hidrodinâmicos.

Seu processo de desenvolvimento começou no ano de 1925 quando os engenheiros Streeter e Phelps, usaram uma formulação matemática simples (conservação de massa) para estudar o comportamento da demanda bioquímica de oxigênio e do oxigênio dissolvido na água, ao longo do rio Ohio, podendo assim medir o nível de poluição do rio. Nascia desta forma, a modelagem matemática como uma metodologia científica capaz de estudar de forma simples e objetiva os problemas relacionados com corpos d'água.

Os modelos de qualidade da água são estabelecidos a partir do princípio da conservação das massas, que estabelece: "Para um determinado volume, o fluxo de massa que entra, menos o fluxo de massa que sai, é igual à variação de massa no interior deste volume". Os avanços tecnológicos na área computacional permitiram traduzir os modelos matemáticos em formulações numéricas de equações diferenciais baseadas em princípios fisicamente bem estabelecidos (e.g. equações de conservação de movimento e de massa,

equação da continuidade e de estado, etc.) aplicáveis em grandes extensões de corpos de água através da discretização em malhas. Assim, atualmente, o uso da modelagem numérica e computacional na avaliação da qualidade de água dos mais variados mananciais passou a ser indispensável, pois com o auxílio desta ferramenta é possível estabelecer e prever os principais processos e relações ecológicas presentes na dinâmica do ecossistema aquático.

A modelagem tem como grande vantagem sobre os métodos empíricos e físicos, a capacidade de fazer previsões para diferentes cenários, em um intervalo de tempo bastante curto e com baixo custo. A modelagem é capaz de, a partir da criação de um modelo digital do terreno alimentado pelos dados de entrada, calcular as concentrações das mais variadas substâncias que se encontram no interior do mesmo. Mas, além disso, os modelos são capazes de simular diferentes situações de lançamentos e apresentar a evolução da concentração para um futuro próximo, caso aquele cenário seja mantido. Com isso, torna-se muito mais viável o controle de lançamentos de poluentes, bem como o processo de gestão dos usos das águas daquele corpo hídrico.

Os modelos são uma forma prática de entender os corpos d'água a partir de um sistema de equações capazes de representar o escoamento a partir de dados ambientais de entrada. Esses modelos são usados para inferir situações conhecidas ou hipotéticas, permitindo a compreensão do fenômeno simulado, o que é fundamental para tomada de decisões diversas e principalmente em situações de acidentes.

Nesse trabalho será utilizado o Sistema Base Hidrodinâmica Ambiental (SisBahia), que é um software acadêmico desenvolvido pela Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica do COPPE/UFRJ. Ele utiliza elementos finitos na discretização espacial e diferenças finitas na discretização temporal. [Rosman, 2009]. A descrição das suas principais características, assim como sua aplicação no presente estudo, será apresentada no capítulo sobre a metodologia.

## 2.4 A BAÍA DA ILHA GRANDE

A Baía da Ilha Grande (BIG), mostrada na Figura 2.7, está localizada entre as cidades de Angra dos Reis e Paraty, nos meridianos  $44^{\circ}$  W e  $44^{\circ} 40'$  W e as latitudes  $23^{\circ}$  S e  $23^{\circ}40'$  S, compondo um sistema estuarino com a Baía de Sepetiba. Está em uma área relativamente bem preservada e é considerada uma região importante onde ocorrem remanescentes da floresta atlântica [Belo, 2003].

A baía possui uma significativa diversidade de ecossistemas marinhos, sendo em grande parte rodeada por costões rochosos, ilhas, praias e manguezais; essas características são marcantes da costa verde do sudeste Brasileiro, onde a Serra do Mar adentra o litoral em diversas áreas. No canal central da baía, observa-se que sua geomorfologia é bastante heterogênea. Os processos físicos de circulação e sedimentação que atuam no canal podem apresentar flutuações e resultar na seleção dos sedimentos de fundo.

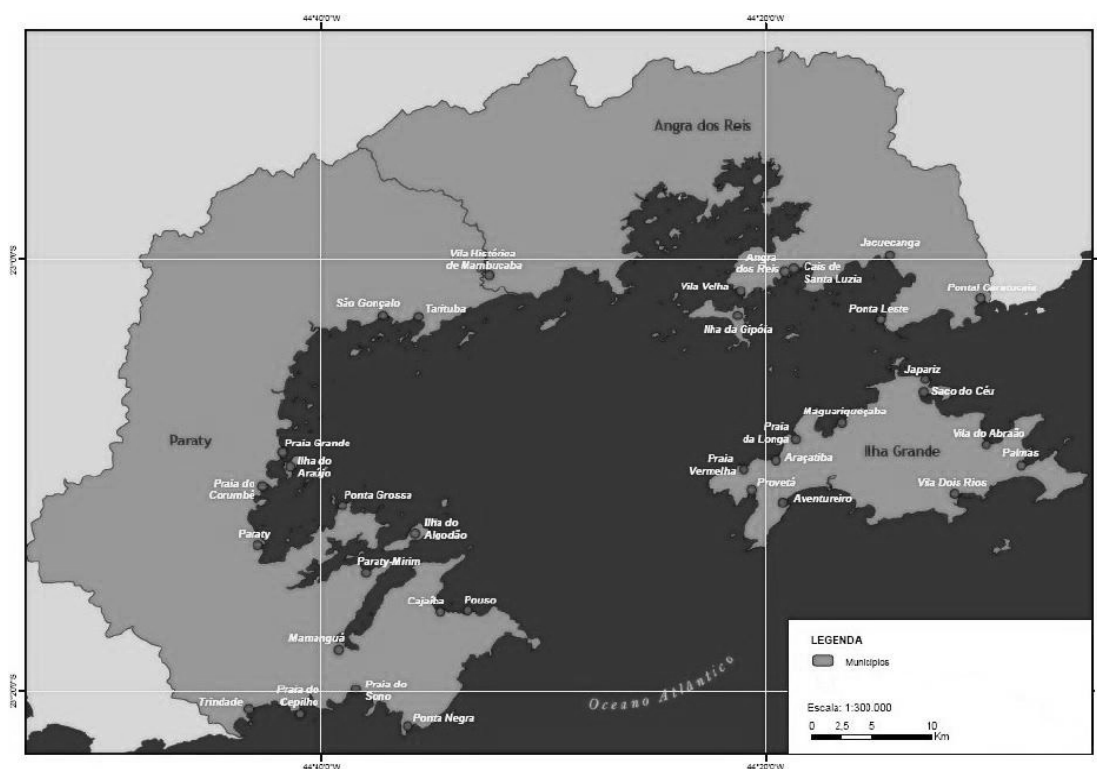


Figura 2.7 – A Baía de Ilha Grande.



As formas de fundo são estruturas sedimentares primárias que são resultado da ação das ondas e correntes sobre o fundo com sedimentos inconsolidados. As investigações das formas de fundo são uma importante ferramenta na estimativa e avaliação dos agentes físicos que deram origem a ele [Belo, 2003].

Estudos de laboratório e de campo vêm sendo realizados no sentido de se estimar a magnitude do escoamento que gera essas estruturas, levando em conta as relações entre a energia do agente, as propriedades do fluido e do sedimento.

Devido à dificuldade de se estabelecer modelos analíticos acurados que descrevessem satisfatoriamente a origem, a morfologia e as condições de escoamento associado a estas estruturas, vários diagramas foram elaborados, relacionando a certos tipos de formas de fundo o diâmetro médio dos grãos, o estresse cisalhante junto ao leito, a profundidade de ocorrência das estruturas e as velocidades de fluxos tanto unidirecionais – gerados por corrente – quanto oscilatórios – gerados por ondas.

Estudos realizados na porção oeste da baía da Ilha Grande para a companhia FURNAS, na região de Itaorna, mostraram que a média anual das alturas significativas das ondas observadas foi de 1,8 m e seu período de 10,3 segundos, sendo estes valores máximos no inverno e mínimos no verão. Esses resultados mostram a distribuição de ocorrência de ondas nesta região da baía [Belo, 2003].

As ondas mais freqüentes durante o ano na porção oeste vêm da direção E (24%), e da direção NE (16%), seguidas das ondas de SE (10%), S (11%) e SW (12%). As ondas de SE, S e SW foram mais freqüentes na primavera (12, 14 e 15%, respectivamente). As alturas mais freqüentes ao longo do ano (80%) estão entre 0,3 e 1,5m, sendo o verão a estação com menores alturas de onda (0,3 a 0,5m), com 54% das observações nesse período [Silva, 1996].

No inverno, esta variação passa a 38,5%. As ondas de maiores alturas (1,6 a 3,5m) representam 12%, exceto no inverno quando chegam a 14,5%.

Destas, 3% estão na faixa de 2,6 a 3,5 m, exceto no inverno com 6% de ocorrência. Estas alturas estão mais ligadas a ondas de direções E, SE e SW. A geografia da linha de costa da BIG facilita a penetração das ondas do quadrante S–SE, que teriam maior ação na região de Mambucaba (na porção oeste) e em todo litoral a oeste da Ilha Guaíba (na porção leste), região de Conceição de Jacareí, enquanto as ondas vindas de outros quadrantes seriam bloqueadas ou parcialmente bloqueadas, como as de SW [Belo, 2003].

Com base nos estudos de Signorini (1980), pode-se inferir que os processos de transporte predominantes na parte central da BIG seriam prioritariamente de baixa energia, e a sedimentação, controlada por processos hidrodinâmicos. A BIG tem uma circulação horária quase estacionária, independente das oscilações de maré e de vento.

Há teorias que propõem que o mecanismo de circulação seria similar ao de um sistema estuarino composto pelas baías de Ilha Grande e de Sepetiba, parcialmente misturado e possuindo componentes de circulação gravitacional, residual de maré e gerada pelo vento. Sua circulação seria definida por um fluxo quase estacionário para leste induzido por gradientes de densidade. Estudos mostram os campos de densidade e de velocidade de correntes que indicaram oscilações, devido à geometria local e à estratificação da coluna d'água, associadas à descarga da baía de Sepetiba e à penetração sazonal da ACAS (Água Central do Atlântico Sul).

Medições de corrente mostraram que estas apresentam reversões esporádicas a 15 metros de profundidade, porém, com um escoamento predominante para leste. Pode-se observar com base nestas medições, a possível influência de forçantes atmosféricos no comportamento das correntes, evidenciados por eventos de maior velocidade, da ordem de 0,60 m/s para leste, associados a componentes de períodos superiores a 30 horas [Fragoso, 1999].

Houve também períodos em que o escoamento foi predominante para oeste com velocidades de pico da ordem de 30 cm/s. Estas medições

mostraram ainda que o período natural de oscilação do sistema Ilha Grande/Sepetiba é bastante próximo a 6 horas [Fragoso, 1999].

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA BAÍA DA ILHA GRANDE**

A geomorfologia da BIG pode ser descrita, inicialmente, por dois corpos d'água separados por um canal estreito formado entre a Ilha Grande e o continente. Em 1987, Mahiques propôs a divisão fisiográfica da baía em porção Leste, porção Oeste e canal central.

A região tem uma batimetria variável. As porções Oeste e Norte da baía apresentam profundidades inferiores a 10 metros, em regiões próximas à costa (Baías de Parati e da Ribeira). A profundidade aumenta gradativamente em direção ao oceano, com 33 metros de profundidade na entrada da baía.

De acordo com Mahiques (1987), a porção Oeste apresenta profundidades médias superiores a 20 metros e máximas da ordem de 40 metros. Áreas mais rasas, inferiores a 10 metros, encontram-se a oeste, na Enseada de Parati, e a norte, na Baía da Ribeira. O canal central é estreito e alongado segundo a direção leste-oeste, e apresenta as maiores depressões do interior da Baía com regiões de profundidade máxima de 55 metros. Esse canal se prolonga, inicialmente, para sudeste e, posteriormente, para nordeste, em uma feição retilínea que atinge a entrada da Baía de Sepetiba. A porção Leste apresenta um relevo mais plano, com profundidades entre 10 e 25 metros e é cortada pelo prolongamento do canal central.

A água que ocupa o interior da baía é resultante da interação de duas águas de origens diferentes: uma oceânica, que se origina da região adjacente da plataforma continental, e outra de origem continental produzida pela descarga fluvial que ocorre principalmente na Baía de Sepetiba. Aspectos

importantes sobre a interação destas duas águas foram descritos por Miranda *et al.* (1977), onde através da análise de um registro contínuo de temperatura e salinidade obtido na água superficial ao redor da Ilha Grande, foi detectado um “front” salino ao longo da entrada sul da Baía de Sepetiba.

A existência deste “front” foi atribuída à interação da água costeira com uma água menos salina e ligeiramente mais quente, que vem da Baía de Sepetiba. Ikeda & Stevenson (1982), observaram “fronts” salinos em quatro pontos dentro da baía e concluíram que é grande a freqüência de passagem de “fronts” na área, separando a água oceânica da água costeira, sempre acompanhada de rápidas reversões na corrente.

Estudando algumas características da circulação e da variabilidade das correntes na baía, verifica-se a existência de uma circulação de fundo no sentido horário, com entrada de água pela porção Oeste e saída pela porção Leste. Observou-se, também, a ocorrência de um fenômeno periódico, somente na profundidade de 10 metros, a que deram o nome de “pulsação”. Este fenômeno ocorria de hora em hora e durava cerca de 10 a 20 minutos e imprimia à corrente acelerações bastante intensas [Ikeda & Stevenson, 1980].

Também foram detectadas oscilações com período de uma hora na porção Oeste, mas neste caso as oscilações foram interpretadas como sendo *seiches*. Outro fato observado foi a predominância de um padrão de circulação horário e quase estacionário, ao redor da Ilha Grande. A causa deste movimento foi atribuída à distribuição horizontal de densidade com fraca influência da maré e do vento [Signorini, 1980].

Matsuura (1986) coletou dados suficientes, entre 1976 e 1981, para estabelecer um modelo de circulação das principais massas de água na Baía de Ilha Grande, analisando as distribuições horizontais e verticais de temperatura e salinidade. Desta forma, foi possível classificar as massas de água, em função de sua localização e profundidade, na Baía da Ilha Grande, em: água tropical, água central do Atlântico Sul, água costeira e água de plataforma.

Dados de correntometria obtidos de estações oceanográficas posicionadas no canal central durante 32 horas identificaram a existência de processos dinâmicos diferenciados, no fundo (25 metros) e na superfície (10 metros). Desta forma, a circulação da superfície é apresentada por uma corrente bastante intensa e unidirecional, com predominância quase total do sentido sudeste. A circulação no fundo apresenta-se como um fluxo de baixa velocidade com sentido predominante para nordeste, porém com uma componente para sudeste que reflete a existência de um mecanismo de maré, fato confirmado por [Ikeda *et al.* 1989, *apud* Mahiques, 1987].

Mahiques (1987), para caracterizar os sedimentos de fundo da Baía da Ilha Grande, fez a coleta de 153 amostras dos sedimentos de fundo da Baía de Ilha Grande e da plataforma continental adjacente. Para se caracterizar a granulometria da região, as amostras foram analisadas pelas técnicas de peneiramento e pipetagem; desta forma, os sedimentos de fundo foram classificados entre argila e areia grossa.

Visando caracterizar o regime de ventos na Baía da Ilha Grande, Nicolli (1982), mostrou uma predominância de ventos no primeiro quadrante (~30%) seguido dos ventos de terceiro quadrante (~27%), mostrando que o regime de ventos tem uma característica bidirecional.

Franklin (2001) observou, com auxílio dos dados obtidos de estações meteorológicas da DNH (Diretoria de Hidrografia e Navegação), a existência de um padrão diário e outro noturno. Durante o dia (das 7 às 17 horas) predominam as brisas do mar de S (10 a 30% das ocorrências), com velocidades médias de 2,0 m/s e, à noite, aparecem os ventos de NNE-NNW (10% a 30% das ocorrências), com velocidades médias de 1,6 m/s.

## 3.2 DADOS DE ENTRADA DO MODELO

### 3.2.1 BATIMETRIA

A batimetria utilizada neste estudo foi elaborada a partir da digitalização das cartas náuticas no 1607 (Baías da Ilha Grande e Sepetiba), no 23100 (Rio de Janeiro a Santos), no 1637 (Baía da Ribeira) e no 1633 (Baía da Ilha Grande parte Oeste), editadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação – DHN. As cotas batimétricas foram acrescidas de 0,68 cm, de forma que as profundidades correspondessem ao nível médio d'água encontrado na Baía da Ilha Grande, uma vez que nas cartas náuticas da Marinha do Brasil, as isóbatas de profundidade estão referenciadas a um nível de redução seguro para fins de navegação, o nível médio das baixamares de sizígia (MLWS). A partir desses dados, foi gerada uma grade batimétrica através de interpolações, onde para cada nó pertencente à malha foi calculada uma profundidade. A batimetria atual e a discretização do domínio de modelagem está apresentada na Figura 3.1.

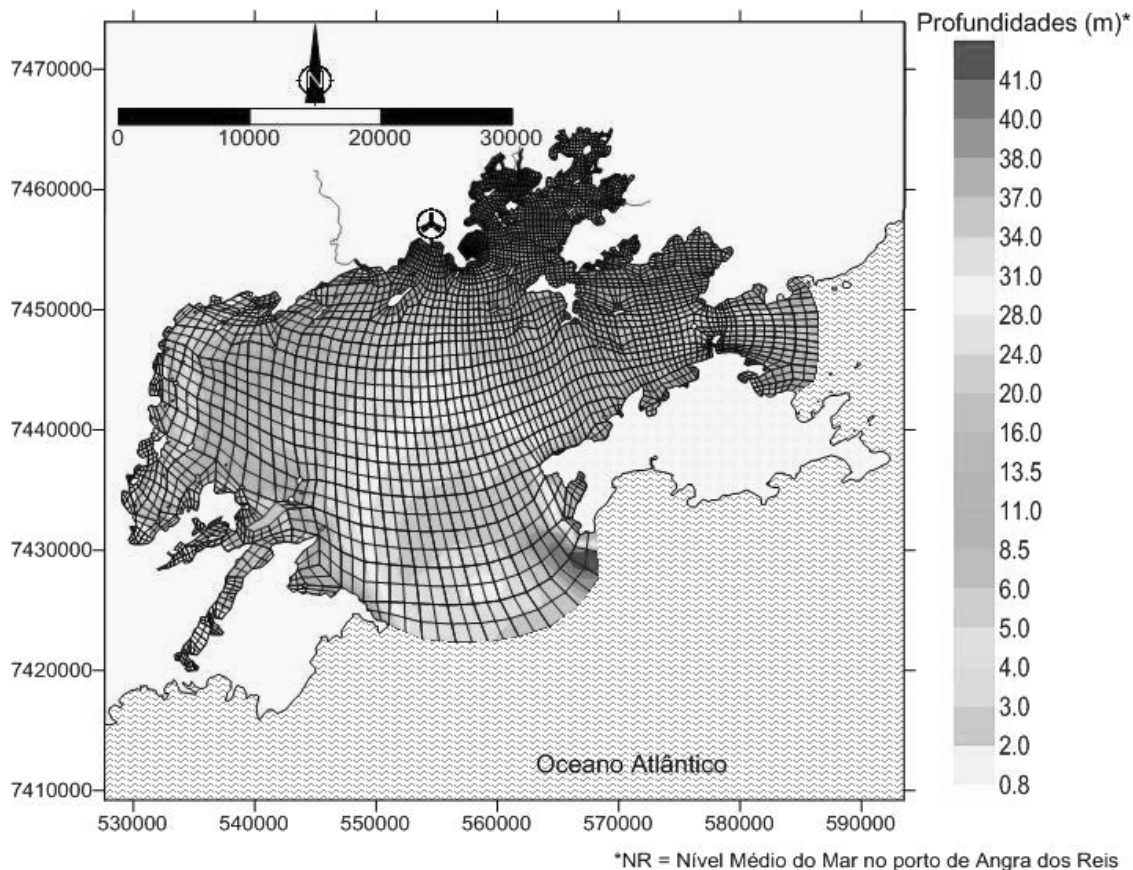


Figura 3.1 – Domínio modelado na Baía da Ilha Grande, indicando a malha de discretização em elementos finitos e a batimetria atual referente ao nível médio do mar no Porto de Angra dos Reis. Os eixos representam distâncias em metros. O símbolo de radioatividade marca a área de liberação acidental na CNAAA.

### 3.2.2 DADOS DE MARÉ

Para realizar as simulações, tendo a maré como forçante, foi necessário conhecer de que maneira a onda de maré se propaga na região a ser modelada, ou seja, como a onda de maré se propaga pelas fronteiras abertas 1 e 2. A partir de medições do nível d'água no interior do domínio (Estação maregráfica de Angra dos Reis), pode-se prescrever as condições de contorno para as Fronteiras abertas. Para as simulações do modelo da Baía de Ilha

Grande são consideradas marés sintéticas geradas a partir das constantes harmônicas de Angra dos Reis.

A especificação da altura da maré para os contornos foi calculada a cada passo de tempo utilizando as constantes harmônicas apresentadas na Tabela 1 para a estação maregráfica de Angra dos Reis. O período selecionado para realizar a simulação foi de 30 dias, de forma a conter períodos de marés de sizígia e quadratura. Na Figura 3.2 a seguir ilustra-se curva de maré típica de Angra dos Reis usadas como condições de contorno para as simulações realizadas.

O posicionamento da fronteira aberta 1 é quase perpendicular a frente de maré, que se propaga na costa predominantemente de oeste para leste, assim como também é perpendicular a fronteira 2, localizada em uma região mais abrigada. Logo, é esperado que exista diferença de fase ou defasagem na chegada da onda de maré entre as duas fronteiras, ou seja a onda de maré deverá chegar primeiro a fronteira 1 e depois a fronteira 2. Essa defasagem entre as duas fronteiras foi estimada em 600 segundos. Em situações de efluxo prescreve-se como condição de contorno a variação do nível da maré. Como não há medições de estações maregráficas disponíveis para as fronteiras abertas, mas apenas para o interior do domínio, foi aplicada a modelagem inversa usando os dados da Tabela 1. Para as situações de afluxo, a condição prescrita foi forçar o escoamento a entrar na direção normal a fronteira.



Tabela 1 – Constantes harmônicas referentes à estação maregráfica de Angra dos Reis, Baía de Ilha Grande, RJ, listadas pela significância da amplitude.

Nome	Período (s)	Amplitude (m)	Fase (graus.)
M2	44714.16439359	0.2869	1.3799
S2	43200.00000000	0.1649	1.4396
O1	92949.62999305	0.0967	1.4692
M4	22357.08219679	0.0332	0.5664
K1	86164.09076147	0.0535	2.4888
K2	43082.04523752	0.0516	1.2908
N2	45570.05368141	0.0356	2.1349
MS4	21972.02140437	0.0165	2.0408
MN4	22569.02607322	0.0144	6.0327
Q1	96726.08402232	0.0270	1.0818
L2	43889.83274041	0.0164	1.6310
P1	86637.20458000	0.0171	2.2640
2N2	46459.34813490	0.0098	2.2611
M3	29809.44292906	0.0121	3.4137
MU2	46332.00000000	0.0155	1.7054

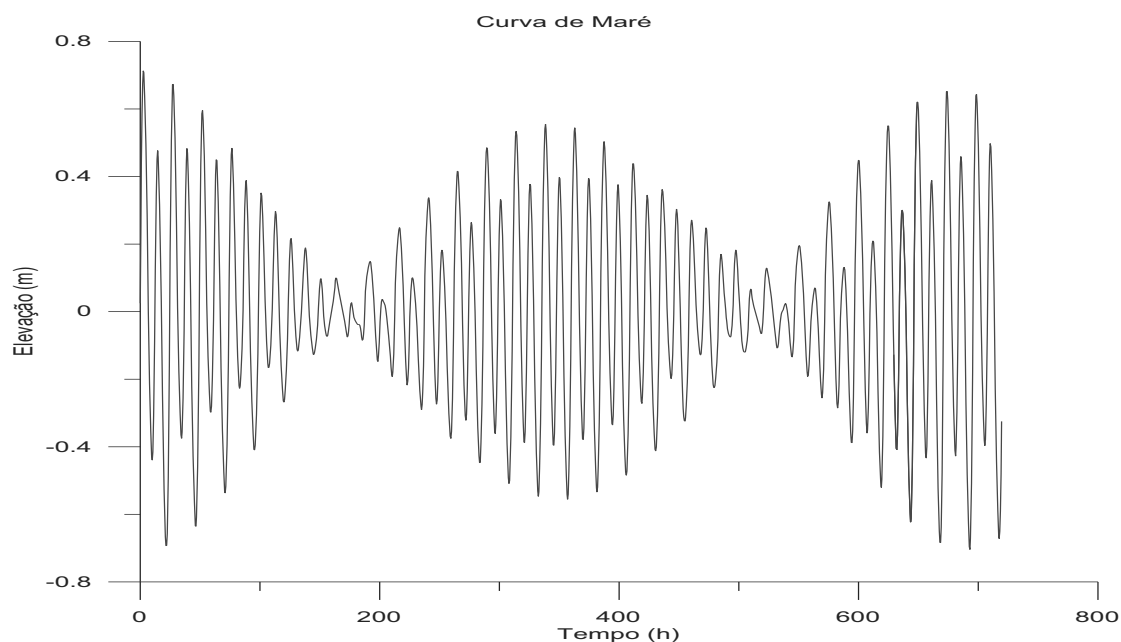


Figura 3.2 – Curva de maré típica na região de Angra dos Reis, ao longo de um mês, ilustrando as condições usadas na modelagem da baía de Ilha Grande, geradas com as constantes harmônicas da Tabela 1.

### 3.2.3 DADOS DE VENTO

Os dados de vento para modelagem da circulação hidrodinâmica podem ser fornecidos de diversas formas ao modelo. Os dados podem ser desde constantes no tempo e uniformes no espaço, até totalmente variáveis no tempo e variados no espaço. O fornecimento de dados de vento variados no espaço depende da disponibilidade de medições, que em geral só são efetuadas em pontos esparsos. Assim, é mais comum alimentar o modelo com dados de vento variáveis no tempo, mas uniformes no espaço.

Para simular padrões de ventos típicos na região foi selecionado o regime de vento local, caracterizado por regimes de ventos noturno e diurno. Os dados analisados neste trabalho foram coletados pela estação meteorológica B15 da CNAAA, em Ponta Fina na praia de Itaorna durante os

anos de 1995 e 1996. A escolha desta torre meteorológica, situada em cota adequada, deve-se à sua localização estratégica próxima à arrebentação do mar, sobre um promontório rochoso e sem muita influência da geomorfologia local.

Esta torre, por estar mais exposta ao mar, recebe os ventos diretamente, antes que estes sejam desviados ao longo das encostas. Os dados de ventos foram coletados de 15 em 15 minutos por sensores meteorológicos, sendo manipulados de forma a compor uma série média horária. Analisando os dados meteorológicos coletados pela torre meteorológica da CNAAA, pertencentes ao programa Pré-operacional da usina de Angra 1, percebe-se que no período que se inicia entre 7 e 9 horas e termina entre 15 e 17 horas, os ventos predominantes foram N e ES-SE, com velocidades de 4 a 8 m/s que podem chegar a 12 m/s e entre as 17 horas e 7 horas, ocorre predominância de ventos WSW e SW de menor intensidade, entre 1 e 5 m/s, conforme mostra a figura 3.3.

Foram considerados na modelagem, apenas os dados referentes aos ventos medidos na estação meteorológica de Itaorna que tem maior influência sobre a hidrodinâmica no campo próximo ao termo fonte. As séries históricas que alimentaram o modelo são características de regime predominante de ventos na área. Além disso, Franklin (2001) avaliou a influência dos ventos em três cenários (regime normal, calmaria e frentes frias) sobre a dispersão de radionuclídeos liberados rotineiramente pela CNAAA e concluiu que as frentes frias não produziam resultados diferentes daqueles do regime normal, enquanto este implicou em significativa evolução da pluma em comparação com as calmarias. Assim, o modelo foi alimentado apenas com dados característicos do regime predominante.

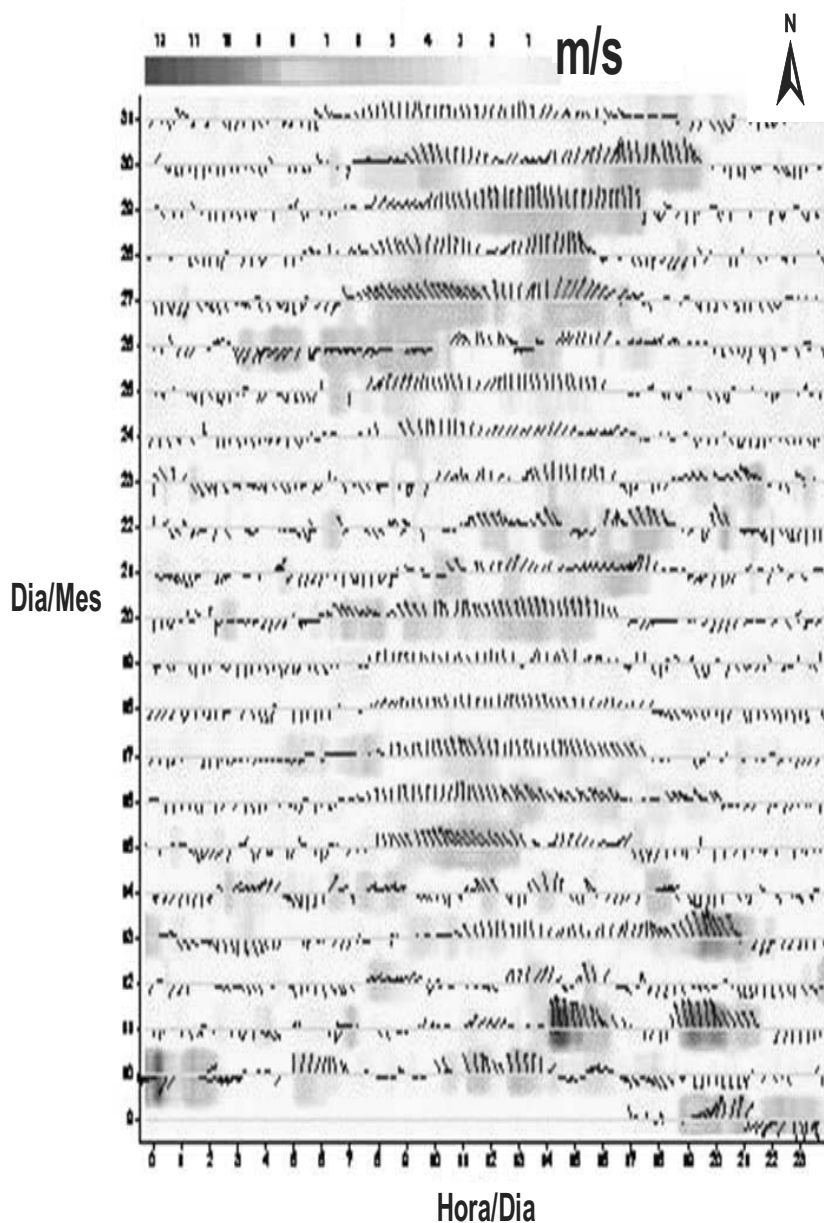


Figura 3.3 – Gráfico da série temporal de ventos da estação meteorológica da CNAAA, cujo registro de ventos usuais foi fornecido ao modelo como dados de entrada. As setas têm módulo proporcional à velocidade do vento, que é indicada pelo padrão de cores. A direção e sentido do vento são indicados pelas setas, em relação ao norte geográfico.

### 3.2.4 DADOS DE VAZÃO FLUVIAL

A bacia hidrográfica da região caracteriza-se pelo contato direto da Serra do Mar com o oceano, sendo as planícies costeiras pouco desenvolvidas ou mesmo inexistentes. Por possuírem uma pequena área de drenagem, os rios da região, apresentam pequena vazão média. Enquadram-se na categoria dos rios de regime austral, apresentando os maiores picos de vazão no verão e, no inverno, pequenas vazões. Os rios da região possuem alta declividade média, pois nascem em altitudes elevadas e possuem pequena extensão, da ordem de 15 km. O rio mais importante da região é o rio Mambucaba, que possui extensão superior ao mencionado. A bacia de drenagem do rio em questão ocupa uma área de drenagem de 592 km<sup>2</sup>, o que corresponde a 78% da área total da bacia hidrográfica local. Conforme a Figura 3.3, o rio Mambucaba apresenta um regime de maiores vazões nos meses de janeiro a março, sendo que neste último mês a vazão média é de 41 m<sup>3</sup>/s e a vazão máxima chega a 157 m<sup>3</sup>/s. O período de estiagem corresponde aos meses de junho a outubro, enquanto que os meses de agosto e setembro são os mais secos, sendo 14 e 10 m<sup>3</sup>/s as vazões médias e mínimas para estes dois meses.

O Rio Mambucaba foi usado na prescrição das condições de contorno da fronteira de terra (fechada), que caracterizam as margens do corpo de água (domínio de modelagem) e a região de terra adjacente. Foram prescritos valores iguais a zero para todos os nós, com exceção daquele referente ao rio, com vazão média de 27,5 m<sup>3</sup>/s, assim como dois nós que representaram, respectivamente a captação (Itaorna) e descarga (Saco de Piraquara de Fora) de uma vazão líquida de 120 m<sup>3</sup>/s. Foi igualmente considerado o efeito do atrito lateral nos contornos fechados, modificando a tensão de atrito no fundo, através da especificação de um índice de deslizamento entre 0 e 1, que foi prescrito no valor de 0,7.

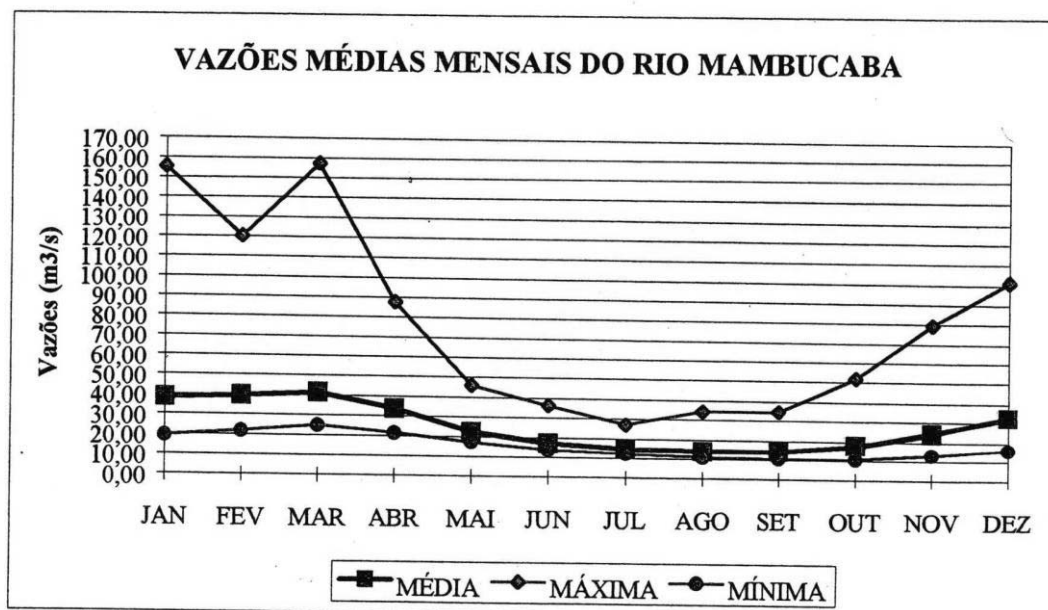


Figura 3.4 – Hidrograma de vazões do Rio Mambucaba

### 3.3 MODELO HIDRODINÂMICO 2DH

Em qualquer código numérico para analisar a circulação e a qualidade de água em corpos de água naturais, a base é o modelo hidrodinâmico. O SisBAHIA contém um modelo hidrodinâmico filtrado no tempo e espaço que é otimizado para corpos de água naturais. Os filtros usados na modelagem da turbulência são semelhantes aqueles empregados na simulação de grandes vórtices. A versão 3D do modelo hidrodinâmico resolve as equações completas de Navier-Stokes com aproximação para águas rasas, utilizando uma eficiente técnica numérica em dois módulos, calculando inicialmente os valores da elevação da superfície livre através de um modelamento bidimensional na horizontal ou integrado na vertical (2DH) e, em seguida, o campo de velocidades que pode ser computado de forma 3D ou apenas em 2DH no caso em que não há estratificação da coluna de água.

Considerando um referencial Euleriano (fixo), a equação da conservação da quantidade de movimento (Segunda Lei de Newton), para as 3 direções pode ser escrita como [Rosman, 2009]:

Equação da quantidade de movimento na direção x:

$$\begin{aligned}
 & \overbrace{\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}}^{a_x} \\
 &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2\varphi \sin \theta v \quad [1] \\
 & \underbrace{\hspace{15em}}_{\sum \frac{F_x}{\rho_0} \delta_x \delta_y \delta_z}
 \end{aligned}$$

Equação da quantidade de movimento na direção y:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = & \\
 -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2\Phi \operatorname{sen} \theta u & \quad [2]
 \end{aligned}$$

Equação da quantidade de movimento na direção z:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = & \\
 -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) - \frac{\rho}{\rho_0} g & \quad [3]
 \end{aligned}$$

onde  $u$ ,  $v$ , e  $w$  são, respectivamente, as componentes do vetor velocidade nas direções  $x$ ,  $y$ , e  $z$ . A direção vertical  $z$  é positiva para cima e sua origem pode ser convenientemente definida no nível médio da superfície da água.  $P$  é a pressão,  $\rho$  a densidade local do fluido e  $\rho_0$  é uma densidade constante de referência. O último termo da equação representa a atuação das forças de

Coriolis, onde  $\Phi$  é a velocidade angular de rotação da Terra no sistema de coordenadas local e  $\theta$  é o ângulo de Latitude [Rosman, 2009]. As acelerações de Coriolis apresentadas nessas equações consideram apenas o efeito devido às componentes horizontais do campo de escoamento, já que a componente vertical do campo de velocidades é desprezível em escoamentos de grande escala em corpos de água rasos. As acelerações de Coriolis são bastante pequenas junto ao equador.  $\tau_{ij}$  é o tensor de tensões turbulentas, expresso através da notação usual [Rosman, 2009]:

$$\tau_{ij} = \rho_{ij} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad [i,j=1,2,3] \quad [4]$$

A equação de incompressibilidade ou equação da continuidade complementa o modelo:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad [5]$$

Essa equação é uma imposição geométrica sobre o campo de escoamento admissível, forçando que o divergente da velocidade do escoamento em qualquer ponto seja zero. Isso equivale a dizer que o volume ocupado por um grupo de partículas fluidas em escoamento permanece constante (Rosman, 1997). Se o volume das partículas se expandisse, as partículas estariam divergindo e o divergente do escoamento seria positivo. Por outro lado, se o volume das partículas em escoamento se contraísse, as partículas estariam convergindo e o divergente do escoamento seria negativo.

Conseqüentemente, o termo “continuidade” deve ser entendido como continuidade do “volume”. No caso especial de fluido homogêneo, pode-se demonstrar que a continuidade do volume é equivalente à continuidade da massa. Entretanto, escoamentos ambientais geralmente não são homogêneos já que possuem densidade variável. Contudo, quase sempre a imposição da



condição de escoamento incompreensível é uma aproximação boa e prática. Assim, para escoamentos ambientais, é preferível dizer que a equação (5) representa a continuidade do volume, e não a continuidade da massa [Rosman, 2009].

Agora vamos integrar a equação da continuidade na vertical; assim, é necessário definir bem as condições de escoamento na superfície livre ( $S$ ) e no fundo ( $F$ ). Para isso, basta dizer que essas superfícies são permanentes, isto é, a superfície livre e o fundo não se movem como um todo. Claro que localmente um ponto da superfície pode variar sua elevação, mas a superfície como um todo não se move. Essas condições são chamadas de Condição de Contorno Cinemática na Superfície Livre (CCCSL) e Condição de Contorno Cinemática no Fundo (CCCF). Dizer que essas superfícies não se movem como um todo equivale a dizer que a velocidade global delas é igual a zero, ou que a posição global das mesmas não varia ao longo do tempo. Assim, a CCCSL, equação e CCCF podem ser escritas como [Rosman, 2009]:

$$\frac{dS}{dt} = 0 \quad \therefore \quad \frac{d}{dt}(S \equiv z - \zeta(x, y, t)) = 0 \quad \therefore$$

$$\left[ w - \frac{\partial \zeta}{\partial t} - u \frac{\partial \zeta}{\partial x} - v \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \right]_{z=\zeta(x,y,t)} \quad [6]$$

$$\frac{dF}{dt} = 0 \quad \therefore \quad \frac{d}{dt}(F \equiv z + h(x, y, t)) = 0 \quad \therefore$$

$$\left[ w + \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \right]_{z=-h(x,y)} \quad [7]$$

onde o termo com a derivada de  $h$  em relação ao tempo  $t$  será zero, se não forem considerados erosão ou sedimentação. Nesse caso, o fundo é definido como  $z = -h(x, y)$ .

A equação da continuidade, ou imposição da condição de escoamento incompressível, integrada ao longo da vertical, é obtida através da integração de [5]:

$$\int_{-h}^{\zeta} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dz = 0 \quad [8]$$

Se forem considerados efeitos de evaporação e precipitação na superfície livre, e infiltração na superfície do fundo, a equação pode ser modificada para:

$$\int_{-h}^{\zeta} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dz = q_P - q_E + q_{Ia} - q_{Ie} \quad [9]$$

onde  $q_P$ ,  $q_E$  e  $q_I$  são valores dados de vazões por unidade de área, e.g. [ $m^3/s/m^2$ ], respectivamente, de precipitação, evaporação e infiltração,  $q_{Ia}$  e  $q_{Ie}$  representam vazões de infiltração afluyente e efluente. Tais vazões são funções de  $(x, y, t)$ . Note que enquanto  $q_P$  for maior ou igual a 0 e  $q_E$  menor ou igual a 0, a vazão  $q_I$  pode ser positiva, nula ou negativa [Rosman, 2009].

Utilizando a regra de Leibniz, as condições de contorno cinemáticas, e considerando fundo com topo hidrografia fixa, isto é  $z = -h(x, y)$ , temos:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\zeta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\zeta} v dz = \underbrace{q_P - q_E \pm q_I}_{\Sigma q} \quad [10]$$

que é uma equação integro-diferencial. Em casos mais comuns, é usual desprezar efeitos de evaporação e precipitação na superfície livre e de

infiltração na superfície do fundo, considerando-se então  $\Sigma q = 0$  [Rosman, 2009].

### 3.3.1 A MODELAGEM DE TENSÕES TURBULENTAS

As tensões turbulentas são fluxos de quantidade de movimento por unidade de massa associados a escalas não resolvíveis no tempo e no espaço. Pode-se demonstrar que qualquer método padrão de promediação, como média de Reynolds, média temporal vicinal, e mesmo média estatística, podem ser escritos como um caso particular de um procedimento de filtragem generalizado, Rosman (1989). O processo de filtragem é feito através de uma integral de convolução entre a função de filtragem e a função da variável desejada. Assim, consideremos uma filtragem temporal de uma variável real:

$$u(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{u}(t')G(t-t')dt' = \bar{u}(t) \quad [11]$$

Conforme indicado,  $u = \bar{u}$  representa a parte filtrada ou resolvível da variável real. A barra acima de  $u$  indica a integral de convolução ou o procedimento de filtragem aplicado à variável real.

A função de filtragem pode ser qualquer função com média e variância finitas, satisfazendo a condição de preservação constante, ou seja [Rosman, 2009]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} G(\chi')d\chi' = 1 \quad [12]$$

onde  $\chi$  representa qualquer dimensão.

Aldama (1985) demonstrou que a função gaussiana leva vantagem como função de filtragem no espaço e no tempo. Desta forma, aplicaremos em  $G(x, y, z, t)$  [Rosman, 2009]:

$$G(x, y, z, t) = \sqrt{\frac{6}{\pi}} \frac{1}{\lambda_x} \exp\left(-6 \frac{x^2}{\lambda_x^2}\right) \times \sqrt{\frac{6}{\pi}} \frac{1}{\lambda_y} \exp\left(-6 \frac{y^2}{\lambda_y^2}\right) \times \sqrt{\frac{6}{\pi}} \frac{1}{\lambda_z} \exp\left(-6 \frac{z^2}{\lambda_z^2}\right) \times \sqrt{\frac{6}{\pi}} \frac{1}{\lambda_t} \exp\left(-6 \frac{t^2}{\lambda_t^2}\right) \quad [13]$$

onde os parâmetros  $\lambda$  são as larguras dos filtros. Quanto maior a largura do filtro, maior a escala da variável resolvível.

Usando o teorema de Gauss, pode-se demonstrar que, para larguras de filtro homogêneas, o operador da derivada é comutativo no procedimento de filtragem, ou seja:

$$\overline{\frac{\partial \tilde{u}}{\partial x}} = \frac{\partial \bar{\tilde{u}}}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad [14]$$

O mesmo é válido para as outras dimensões. Assim, utilizando como exemplo a equação da quantidade de movimento na direção  $x$  para as variáveis reais, tem-se [Rosman, 2009]:

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial \tilde{u}\tilde{u}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{u}\tilde{v}}{\partial y} + \frac{\partial \tilde{u}\tilde{w}}{\partial z}}_{\text{termos advectivos}} = -g \frac{\partial \tilde{\zeta}}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} g \int_z^{\zeta} \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{xx}^M}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}^M}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}^M}{\partial z} \right) + 2\Phi \text{sen } \theta \tilde{v} \quad [15]$$

onde os termos advectivos foram reescritos em uma forma conservativa, usando a equação da continuidade, e  $\tau^M$  representa a tensão viscosa

molecular. Aplicando o procedimento de filtragem a fim de gerar uma equação para as escalas resolvíveis do modelo numérico, obtém-se [Rosman, 2009]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial \bar{u}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z}}_{\text{termos advectivos}} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} g \int_z^{\zeta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \bar{\tau}_{xx}^M}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\tau}_{xy}^M}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\tau}_{xz}^M}{\partial z} \right) + 2\Phi \text{sen } \theta v \quad [16]$$

Os produtos filtrados nos termos advectivos não são resolvíveis, uma vez que necessitam das variáveis reais para serem calculados. Esses produtos representam fluxos da quantidade de movimento por unidade de massa. Para se obter os fluxos da quantidade de movimento por unidade de massa em escalas resolvíveis, a seguinte técnica algébrica é aplicada nos termos advectivos, de modo que os fluxos verdadeiros são separados em partes resolvíveis e não resolvíveis [Rosman, 2009]:

$$\begin{aligned} \underbrace{\frac{\partial \bar{u}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z}}_{\text{termos advectivos}} &= \frac{\partial (\bar{u}\bar{u} + uu - uu)}{\partial x} \\ &+ \frac{\partial (\bar{u}\bar{v} + uv - uv)}{\partial y} + \frac{\partial (\bar{u}\bar{w} + uw - uw)}{\partial z} \quad \therefore \end{aligned} \quad [17]$$

$$\begin{aligned} \underbrace{\frac{\partial \bar{u}\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}\bar{w}}{\partial z}}_{\text{termos advectivos}} &= \underbrace{\frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z}}_{\text{resolvíveis}} \\ &+ \underbrace{\frac{\partial (\bar{u}\bar{u} - uu)}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{u}\bar{v} - uv)}{\partial y} + \frac{\partial (\bar{u}\bar{w} - uw)}{\partial z}}_{\text{não resolvíveis}} \end{aligned}$$

Analisando a técnica algébrica apresentada acima, torna-se evidente que esses fluxos de quantidade de movimento são iguais às diferenças entre os fluxos reais filtrados e os fluxos resolvíveis, podendo ser escritos da seguinte forma [Rosman, 2009]:

$$\frac{\tau_{xx}}{\rho_0} = -(\bar{u}\bar{u} - uu) \quad ; \quad \frac{\tau_{xy}}{\rho_0} = -(\bar{u}\bar{v} - uv) \quad ; \quad \frac{\tau_{xz}}{\rho_0} = -(\bar{u}\bar{w} - uw) \quad [18]$$

Essas tensões turbulentas  $\tau_{ij}$  precisam ser modeladas, ou seja, têm que ser escritas em termos de variáveis resolvíveis. Segundo Aldama (1985), e Rosman (1987), pode-se demonstrar que utilizando a função de filtragem Gaussiana [13], obtém-se uma expansão em série para as tensões turbulentas, formando os assim chamados termos de filtragem [Rosman, 2009]:

$$\begin{aligned} \frac{\tau_{xx}}{\rho_o} &= -\left(\overline{\tilde{u}\tilde{u}} - uu\right) = -\frac{\lambda_k^2}{12} \frac{\partial u}{\partial x_k} \frac{\partial u}{\partial x_k} + T.A.O_{xx} \\ \frac{\tau_{xy}}{\rho_o} &= -\left(\overline{\tilde{u}\tilde{v}} - uv\right) = -\frac{\lambda_k^2}{12} \frac{\partial u}{\partial x_k} \frac{\partial v}{\partial x_k} + T.A.O_{xy} ; [k = 1,2,3,4] \quad [19] \\ \frac{\tau_{xz}}{\rho_o} &= -\left(\overline{\tilde{u}\tilde{w}} - uw\right) = -\underbrace{\frac{\lambda_k^2}{12} \frac{\partial u}{\partial x_k} \frac{\partial w}{\partial x_k}}_{\text{termos de filtragem}} + T.A.O_{xz} \end{aligned}$$

onde  $T.A.O$  são termos de alta ordem, e o índice  $k = 4$  corresponde à dimensão temporal, assim  $x_4 = t$ . As expansões em séries resultantes são válidas somente se as larguras dos filtros forem pequenas em comparação às maiores escalas resolvíveis no domínio de modelagem [Rosman, 2009].

### 3.4 MODELO EULERIANO DE TRANSPORTE ADVECTIVO-DIFUSIVO – 2DH

Considerando as características hidrodinâmicas de muitos corpos d'água de interesse na Baía de Ilha Grande, o modelo de transporte advectivo-difusivo promediado na vertical é adequado para a simulação da distribuição de substâncias ou escalares passivos dissolvidos na coluna d'água.

A equação governante deste modelo sofrerá a atuação do método de média de Reynolds [Martin and McCutcheon, 1999] como filtragem que será adotado para derivação da equação [20], abaixo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = & -\frac{C}{H}(q_P - q_E) + \frac{(C_{Ia} - C)}{H} q_{Ia} + \Sigma R + \\ & \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left( \underbrace{H \left[ D_{xx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial x} \right| \right]}_{T_{xx}} \frac{\partial C}{\partial x} + \underbrace{H \left[ D_{xy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \right]}_{T_{xy}} \frac{\partial C}{\partial y} + \underbrace{H \frac{\Lambda_t^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial t} \right|}_{T_{xt}} \frac{\partial C}{\partial t} \right) + \\ & \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left( \underbrace{H \left[ D_{yx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right]}_{T_{yx}} \frac{\partial C}{\partial x} + \underbrace{H \left[ D_{yy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial y} \right| \right]}_{T_{yy}} \frac{\partial C}{\partial y} + \underbrace{H \frac{\Lambda_t^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right|}_{T_{yt}} \frac{\partial C}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad [20]$$

onde  $C$  é a concentração da substância de interesse,  $q_P$ ,  $q_E$  e  $q_I$  são valores dados de vazões por unidade de área, e.g. ( $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$ ), respectivamente, de precipitação, evaporação e infiltração e  $\Sigma R$  é o somatório das reações cinéticas consideradas, fontes e sumidouros.  $D_{ij}$  é o termo que representa os coeficientes de difusão e dispersão horizontal. Como na equação de quantidade de movimento 2DH,  $\Lambda_k = \alpha_k \Delta x_k$  são as escalas de largura de filtragem local na dimensão  $x_k$  e  $\alpha_k$  são parâmetros de calibração. O valor de  $\Lambda_k$  calibra a quantidade de dispersão e difusão fornecida pelos termos de filtragem. Valores usuais para  $\alpha_k$  estão na faixa de 0.25 a 2.0, e na maioria das vezes o valor 1.0 fornece bons resultados. Esses termos de filtragem são chamados, às vezes, de termos de difusão na escala submalha. Devido aos termos de filtragem, a modelagem do termo  $D_{ij}$  pode ser simplificada por um coeficiente do tipo Elder [Fischer, 1979].

Assim temos os coeficientes nas direções longitudinais e transversais:

$$D_L = \alpha(5.93|u_*|H) \quad ; \quad D_T = \beta(0.15|u_*|H) \quad [21]$$

onde  $D_L$  e  $D_T$  são os valores dos coeficientes ao longo das direções longitudinal e transversal, respectivamente, em relação às linhas de corrente locais, médias na vertical. Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são incluídos para fins de calibragem. Dados esses valores, pode-se determinar facilmente as componentes dos coeficientes de dispersão, Bedford (1994):

$$\begin{aligned} D_{xx} &= D_L \cos^2 \varphi + D_T \sin^2 \varphi \\ D_{xy} &= D_{yx} = (D_L - D_T) \sin \varphi \cos \varphi \\ D_{yy} &= D_L \sin^2 \varphi + D_T \cos^2 \varphi \end{aligned} \quad [22]$$

onde  $\varphi$  é o ângulo entre as linhas de corrente e o eixo x.

A equação [1] pode ser reescrita como [Rosman, 2009]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} &= \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left( T_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + T_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} + T_{xt} \frac{\partial C}{\partial t} \right) + \\ \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left( T_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + T_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} + T_{yt} \frac{\partial C}{\partial t} \right) &- \frac{C}{H} (q_P - q_E) + \frac{(C_{la} - C)}{H} q_{la} + \Sigma R \end{aligned} \quad [23]$$

Expandido-se as derivadas obtêm-se [Rosman, 2009]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} &= \frac{T_{xx}}{H} \frac{\partial C^2}{\partial x^2} + \underbrace{\frac{1}{H} \frac{\partial T_{xx}}{\partial x}}_{u_{xx}} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{T_{xy}}{H} \frac{\partial C^2}{\partial x \partial y} + \\ \frac{1}{H} \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{T_{xt}}{H} \frac{\partial C^2}{\partial x \partial t} + \underbrace{\frac{1}{H} \frac{\partial T_{xt}}{\partial x}}_{u_{xt}} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{T_{yx}}{H} \frac{\partial C^2}{\partial y \partial x} + \\ \frac{1}{H} \frac{\partial T_{yx}}{\partial y} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{T_{yy}}{H} \frac{\partial C^2}{\partial y^2} + \underbrace{\frac{1}{H} \frac{\partial T_{yy}}{\partial y}}_{v_{yy}} \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{T_{yt}}{H} \frac{\partial C^2}{\partial y \partial t} + \underbrace{\frac{1}{H} \frac{\partial T_{yt}}{\partial y}}_{v_{yt}} \frac{\partial C}{\partial t} - \\ \frac{C}{H} (q_P - q_E) + \frac{(C_{la} - C)}{H} q_{la} + \Sigma R \end{aligned} \quad [24]$$



Onde  $u_{xx}$ ,  $v_{yx}$  e similares indicados acima são de fato “velocidades difusivas”.

Usando este conceito chega-se a [Rosman, 2009]:

$$\begin{aligned}
 \underbrace{(1-u_{xt}-v_{yt})}_{P_t} \frac{\partial C}{\partial t} + \underbrace{(U-u_{xx}-v_{yx})}_{P_x} \frac{\partial C}{\partial x} + \underbrace{(V-u_{xy}-v_{yy})}_{P_y} \frac{\partial C}{\partial y} = \\
 \frac{T_{xx}}{H} \frac{\partial C^2}{\partial x^2} + \frac{T_{xy}}{H} \frac{\partial C^2}{\partial x \partial y} + \frac{T_{xt}}{H} \frac{\partial C^2}{\partial x \partial t} + \\
 \frac{T_{yx}}{H} \frac{\partial C^2}{\partial y \partial x} + \frac{T_{yy}}{H} \frac{\partial C^2}{\partial y^2} + \frac{T_{yt}}{H} \frac{\partial C^2}{\partial y \partial t} - \\
 \frac{C}{H} (q_P - q_E) + \frac{(C_{Ia} - C)}{H} q_{Ia} + \Sigma R
 \end{aligned} \tag{25}$$

Usando a notação indicada acima, e admitindo reações de primeira ordem devido a processos de decaimento ( $K_d$ ) ou sedimentação ( $K_s$ ) como representativos das reações cinéticas, e que as fontes e sumidouros sejam representadas por  $I$ , tal que  $\Sigma R = -(K_d + K_s) C + I$ , escreve-se [Rosman, 2009]:

$$\begin{aligned}
 P_t \frac{\partial C}{\partial t} + P_x \frac{\partial C}{\partial x} + P_y \frac{\partial C}{\partial y} = P_{xx} \frac{\partial C^2}{\partial x^2} + P_{xy} \frac{\partial C^2}{\partial x \partial y} + P_{xt} \frac{\partial C^2}{\partial x \partial t} + \\
 P_{yx} \frac{\partial C^2}{\partial y \partial x} + P_{yy} \frac{\partial C^2}{\partial y^2} + P_{yt} \frac{\partial C^2}{\partial y \partial t} - \\
 \frac{C}{H} (q_P - q_E) + \frac{(C_{Ia} - C)}{H} q_{Ia} - (K_d + K_s) C + I
 \end{aligned} \tag{26}$$

onde todos os parâmetros estão definidos nas equações anteriores. A variável  $I$  representa a intensidade de eventuais fontes ( $I > 0$ ), ou sumidouros ( $I < 0$ ).

### 3.5 ESCOAMENTOS EM ÁGUAS RASAS E APROXIMAÇÃO HIDROSTÁTICA

Escoamentos de grande escala, nos quais as escalas dos movimentos horizontais são pelo menos 20 vezes maiores do que a profundidade, podem ser considerados como quase horizontais ou escoamentos em águas rasas. Em tais situações, as equações governantes do movimento são as chamadas equações de águas rasas. Assim, a equação de quantidade de movimento na direção vertical pode ser reduzida à distribuição de pressão hidrostática (aproximação hidrostática).

Deduzidas a partir das equações gerais de escoamentos em regime turbulento, (1), (2) e (3), as equações de águas rasas podem ser obtidas a partir das seguintes hipóteses [Rosman, 2009]:

1. Uma densidade de referência constante,  $\rho_0$ , pode ser considerada em todos os termos, exceto no termo que expressa o empuxo (aproximação Boussinesq). Entretanto, se a coluna de água for considerada bem misturada, o empuxo pode ser negligenciado. Portanto, a equação de estado e as respectivas equações de transporte para os constituintes não se aplicam.
2. Para escoamentos de grande escala, como correntes devidas a marés e ventos, com declividade de fundo relativamente suave, a equação de quantidade de movimento na direção vertical pode ser reduzida à distribuição de pressão hidrostática (aproximação hidrostática). Isso pode ser obtido integrando a equação de quantidade de movimento na direção vertical ao longo da profundidade:

$$\frac{1}{\rho_0} \int_z^\zeta \frac{\partial P}{\partial z} dz = - \int_z^\zeta \frac{\rho}{\rho_0} g dz - \underbrace{\int_z^\zeta \left\{ \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u_j \frac{\partial w}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\tau_{3j}}{\rho_0} + \frac{\tau_{3j}^T}{\rho_0} \right] \right\} dz}_{P_d/\rho_0 \approx 0 \text{ para escoamentos em águas rasas}} dz \quad \therefore \quad [27]$$

$$P(\zeta) - \underbrace{P(z)}_{= P_{atm}} = - \int_z^\zeta \rho g dz - P_d \quad \therefore \quad P(z) = \underbrace{P(\zeta)}_{= P_{atm}} + \int_z^\zeta \rho g dz + P_d$$

onde a elevação  $Z = \zeta(x, y, t)$  define a posição da superfície livre da água. De modo a reduzir o tamanho da equação, a notação indicial usual é utilizada na equação acima. Conforme indicado, para escoamentos de águas rasas, a pressão dinâmica  $P_d$  é desprezível. Chama-se de aproximação hidrostática, o fato de se desprezar a pressão dinâmica [Rosman, 2009].

Substituindo a equação [27] nas equações de quantidade de movimento (1) e (2), e considerando que sobre domínios relativamente pequenos, como no caso de estuários, a pressão atmosférica  $P_{atm}$  permanece praticamente homogênea, pode-se obter a equação da quantidade de movimento efetivamente usada no modelo hidrodinâmico, que pode ser escrita da seguinte forma [Rosman, 2009]:

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} g \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2\Phi \sin \theta_v \quad [28]$$

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

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} g \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2\Phi \sin \theta_u \quad [29]$$

Assim, em qualquer instante  $t$ , o modelo determina quatro incógnitas: a elevação da superfície livre  $\zeta(x, y, t)$ , e três componentes do vetor velocidade,  $u_i(x, y, z, t)$  [Rosman, 2009].

### 3.6 CONDIÇÕES DE CONTORNO

#### 3.6.1 CONDIÇÃO DE CONTORNO PARA O MODELO HIDRODINÂMICO

A existência de uma solução para as equações de águas rasas, que formam o modelo hidrodinâmico de um corpo de água, é dependente de um grupo consistente de condições iniciais e de contorno. Para uma circulação hidrodinâmica, é necessário o estabelecimento de condições de contorno para o campo de velocidade e elevação da superfície livre da água.

A imposição da elevação dos níveis de água é geralmente o principal forçante prescrito ao longo dos contornos abertos. Em um domínio de modelagem, contornos abertos representam os limites do domínio, como por exemplo, a entrada de uma baía ou estuário [Rosman, 2009].

Os contornos de terra representam as margens e seções de rios ou canais que estejam incluídos no domínio de modelagem. A imposição de vazões ou velocidades é geralmente prescrita ao longo dos contornos de terra [Rosman, 2009].

Para corpos de água rasos, a condição de contorno típica em fronteiras de terra é a especificação da componente da velocidade ( $U_N$ ) ou de fluxo ( $Q_N$ ) normal ao contorno. E a condição típica em contornos abertos é a prescrição da elevação da superfície livre ao longo do contorno aberto em qualquer instante.

Em aplicações ambientais típicas, contornos com afluxos sob condições de escoamento supercrítico são raros. Quando situações de afluxos subcríticos ocorrem, em contornos de terra ou abertos, é necessária a prescrição de duas condições. Nesse caso, a condição adicional usual é a prescrição de velocidade tangencial nula no ponto de afluxo [Rosman, 2009].

### 3.6.2 CONDIÇÃO DE CONTORNO PARA O MODELO DE TRANSPORTE EULERIANO – 2DH

Como no modelo hidrodinâmico, existem também condições de contorno de terra e de contorno aberto para o modelo de transporte 2DH. Na verdade, todas as condições de contorno relativas à equação de transporte são condições de fluxo, cujo modelo conceptual pode ser expresso como um fluxo advectivo-difusivo na direção normal ao contorno, imediatamente antes do contorno dentro do domínio, é igual ao fluxo normal total imediatamente depois do contorno fora do domínio. Essa condição de contorno geral pode ser escrita matematicamente como [Rosman, 2009]:

$$U_N C - \left( D_N + \frac{\Lambda_N^2}{12} \left| \frac{\partial U_N}{\partial x_N} \right| \right) \frac{\partial C}{\partial x_N} = \frac{F_N^*}{H} \quad [30]$$

onde o índice  $N$  representa a direção normal e  $F_N^*$  é a carga afluyente por metro linear.

Freqüentemente, ao longo dos nós do contorno de terra,  $U_N$  e  $F_N^*$  são iguais a zero e, conseqüentemente, a equação acima fica reduzida a:

$$\frac{\partial C}{\partial x_N} = 0 \quad [31]$$

No caso de um ponto de contorno com fluxo reversível, onde ocorre Afluxo  $\leftrightarrow$  Efluxo, há que se prescrever um tempo de transição de modo a evitar súbitas mudanças de carga ou concentração quando o fluxo reverte de efluente para afluente. O valor da carga normal  $F_N$  calculado nas fronteiras de terra com fluxo reversível, em situação de afluxo, é dado por [Rosman, 2009]:

$$\text{se } (t-t_o) \leq \tau \Rightarrow F_N = F_o + \frac{F_N^* - F_o}{2} \left[ 1 - \cos\left(\frac{\pi(t-t_o)}{\tau}\right) \right] \quad [32]$$

$$\text{se } (t-t_o) > \tau \Rightarrow F_N = F_N^*$$

onde  $F_N^*$  são os valores prescritos em qualquer tempo  $t$ ;  $F_o$  é o valor calculado no nó de contorno no instante  $t_o$ , que é o instante imediatamente anterior à mudança de situação de efluxo para afluxo. Tau é um período de transição atribuído pelo modelador.

Ao longo de contornos abertos, é usual se desprezar os fluxos difusivos. Além disso, no modelo implementado, duas situações são consideradas [Rosman, 2009]:

- a) Em situações de efluxo, o modelo simplesmente resolve a equação de transporte sem considerar os termos difusivos ao longo dos pontos de contorno:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} = \Sigma R \quad [33]$$

Isso equivale a dizer que uma partícula fluida sai do domínio por advecção, sofrendo eventuais reações no percurso através do contorno.

b) Para um ponto de contorno com afluxo para o domínio, as condições são [Rosman, 2009]:

$$\text{se } (t - t_0) \leq \tau \Rightarrow C = C_0 + \frac{C^* - C_0}{2} \left[ 1 - \cos\left(\frac{\pi(t - t_0)}{\tau}\right) \right] \quad [34]$$

$$\text{se } (t - t_0) > \tau \Rightarrow C = C^*$$

onde  $C^*$  são valores prescritos em qualquer tempo  $t$ ;  $C_0$  é o valor da concentração calculada no nó de contorno no instante  $t_0$ , que é o instante imediatamente anterior à mudança de situação de efluxo para afluxo. Tau é um período de transição atribuído pelo modelador. Esse tipo de condição é particularmente útil para a modelagem de condições de contorno em estuários, quando no fim da vazante a salinidade no limite ao mar do modelo pode ser menor que a do mar [Rosman, 2009].

### 3.7 ACIDENTE COM PERDA DE REFRIGERANTE (*LOSS OF COOLANT ACCIDENT – LOCA*)

Um acidente com a perda do refrigerante (LOCA) é uma forma de falha possível para um reator nuclear que se não for gerida de forma eficaz pode causar danos irreparáveis ao núcleo do reator. Toda planta nuclear têm um sistema de resfriamento emergencial do núcleo (ECCS) o qual é projetado para resfriar o núcleo do reator em caso de um LOCA.

Se o fluxo de refrigerante é reduzido, ou se perde completamente, o sistema de desligamento de emergência é ativado para interromper a reação de fissão em cadeia. No entanto, devido ao decaimento radioativo do combustível nuclear, o núcleo continuará gerando uma quantidade significativa de calor. O calor produzido pelo decaimento dos elementos combustível em

caso de um desligamento do reator é equivalente a 6% da potência térmica do reator.

Em caso de grande perda de refrigerante de tal forma que o sistema de refrigeração emergencial não consiga suprir a demanda por refrigeração, pode ocorrer o derretimento de partes ou total do elemento combustível. Em alguns casos o combustível derretido continua crítico, gerando mais calor, o que forma uma massa crítica levando ao processo de fusão do núcleo.

A questão das margens de segurança em plantas CANDU durante um LOCA tem sido objeto de uma grande quantidade de trabalhos e debates ao longo de muitos anos. Este debate está ligado a uma característica inerente aos reatores nucleares: a reatividade, ou seja, o coeficiente de vazio no núcleo que leva a uma elevação na potência após um LOCA. A percepção da comunidade internacional sobre essa fraqueza inerente das plantas CANDU têm contribuído para discussões sobre as margens de segurança nesses reatores quando se trata deste tipo de acidente. Assunto este presente em convenções periódicas de revisão da segurança nuclear [Muzumdar, 2009].

Em relatório, a COG (CANDU Owners Group), conclui que as plantas CANDU satisfazem as normas internacionais de segurança e são superiores aos LWR's na habilidade em lidar com eventos envolvendo a reatividade. Concluiu-se, também, que a probabilidade de um evento inicializador de um LOCA varia entre  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$  por ano, assim espera-se que a chance de ocorrência de um LOCA seja menor, mas modificações de projeto devem ser consideradas no sentido de priorizar a segurança do reator [Muzumdar, 2007].



## 4. RESULTADOS

### 4.1 CENÁRIOS SIMULADOS

Visando a comparação entre o impacto da liberação rotineira de trítio avaliada por Franklin (2001), com aquele decorrente dos cenários de liberação accidental considerados nesse trabalho, foi criado um modelo digital com os mesmos dados de entrada e forçantes (ventos, marés, rugosidade, batimetria, etc.) empregados no estudo anterior.

Desta forma, vamos tomar a região da BIG, mais precisamente da CNAAA (Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto), onde temos hoje as usinas de Angra 1 e Angra 2 em operação. Foi postulado, então, um cenário onde um reator de água pesada (HWR) do tipo CANDU 6 (ver itens 2.1 e 2.1.1) vai operar no sítio onde atualmente está em construção a usina de Angra 3, que na verdade será um reator de água leve (LWR) pressurizada de segunda geração.

Por consequência da suposta operação deste CANDU 6 na CNAAA ocorrerá, em nossa simulação, um acidente postulado do tipo LOCA (Loss of Coolant Accident). Este LOCA se dará na tubulação do sistema de refrigeração do núcleo onde a alta pressão de um canal de combustível causará um aumento na pressão regional gerando o rompimento de cinco canais de combustíveis, conforme mostrado na Figura 4.1, que segue:

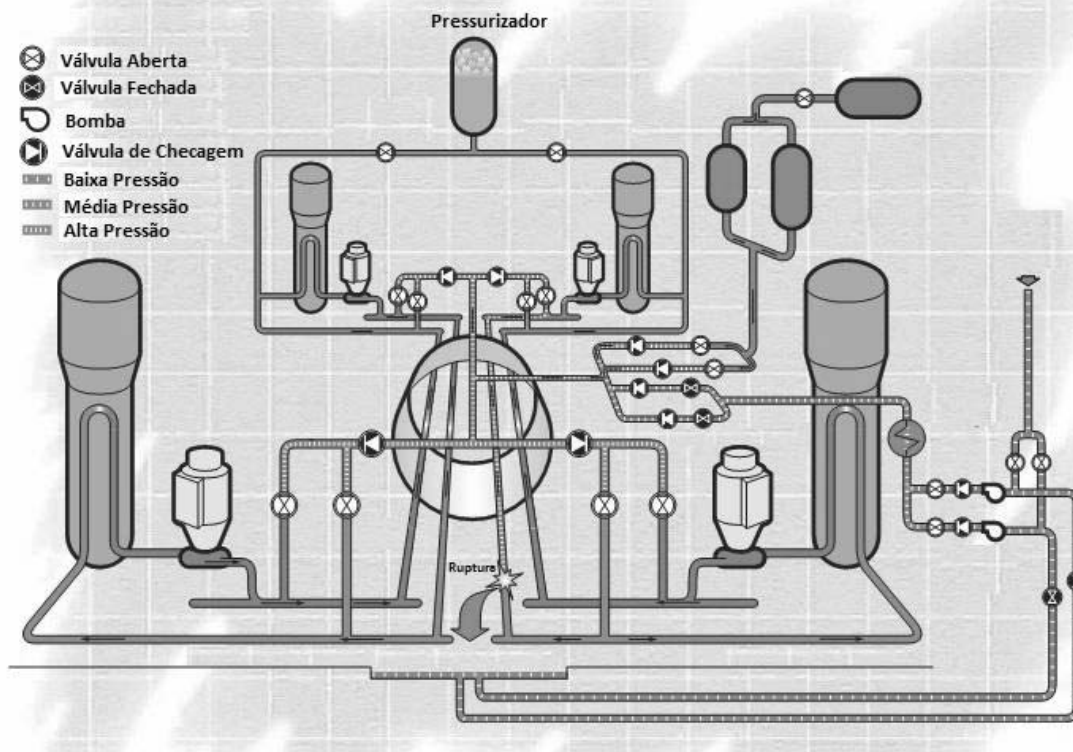


Figura 4.1 – LOCA no Sistema de Refrigeração [CANDU 6, 2005].

Os cenários de modelagem considerados utilizaram os dados descritos na seção 3.2. Se por um lado apenas uma situação de liberação acidental em regime de batelada foi considerada, por outra, em todas as simulações considerou-se condições que cobrissem toda a gama de situações típicas de marés na região de modo a cobrir a gama de marés passando por condições de quadratura e de sizígia. As simulações tiveram duração mais que suficiente para se estabelecer uma situação de equilíbrio na Baía de Ilha Grande. A dispersão foi simulada em dois cenários hidrodinâmicos distintos. No primeiro, considerava-se um desligamento das três usinas nucleares após o acidente na posição da futura Angra III e dessa forma não ocorria a captação em Itaorna e a descarga no Saco de Piraquara de Fora. Em um segundo cenário, considerou-se que as demais usinas (Angra I e II) continuavam a funcionar com a captação e descarga das águas marinhas nos pontos acima mencionados.

- **CENÁRIO 1 (C1):**

De acordo com o contexto acima, como cenário 1, temos a CNAAA (Angra 1, Angra 2, Angra 3 – CANDU) totalmente parado e desligados, ou seja, sem operação das usinas de Angra 1, Angra 2 e Angra 3 e conseqüentemente sem a captação e lançamento de  $194 \text{ m}^3/\text{s}$  na Praia Brava e Piraquara, respectivamente.

- **CENÁRIO 2 (C2):**

De acordo com o contexto acima, temos como cenário 2 a CNAAA (Angra 1, Angra 2 e Angra 3 – CANDU) em funcionamento normal e rotineiro, ou seja, Angra 1, Angra 2 e Angra 3 operando normalmente e com a captação de  $194 \text{ m}^3/\text{s}$  de água do mar (água para os condensadores) em três pontos a frente da CNAAA e o lançamento de  $194 \text{ m}^3/\text{s}$  em Piraquara.

Assim, vazaria instantaneamente para a contenção metade do inventário do sistema de refrigeração do núcleo, cerca de  $66 \text{ m}^3$  de  $\text{D}_2\text{O}$ , bombeado a uma taxa de  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  (vazamento de 5 canais de combustível). Este volume não poderia ser retido na contenção e escoaria pelo circuito de coleta de águas pluviais sendo liberado na BIG durante uma hora, com vazão correspondente a  $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $66 \text{ m}^3 / 3600$  segundos). O inventário de trítio liberado próximo à Praia Brava teria atividade de 35 PBq com concentração de  $530 \text{ TBq}/\text{m}^3$  e carga de cerca de  $10 \text{ TBq}/\text{s}$ .

## 4.2 SIMULAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

Para caracterizar a hidrodinâmica na região da BIG os dados de maré, ventos, batimetria, rugosidade, captação e aporte de água foram inseridos no módulo hidrodinâmico 2DH do SisBaHiA. A caracterização da circulação hidrodinâmica só foi possível com a prescrição de adequadas condições iniciais e de contorno além dos dados e parâmetros usados na simulação.

No modelo hidrodinâmico utilizou-se dois tipos de condição de contorno, condição de contorno de terra e condição de contorno aberto. As condições de contorno representam condição de fluxo advectivo-difusivo normal à fronteira, seja ela de terra ou de mar.

Como condição inicial, foi imposta uma situação de máximas elevações em toda baía com velocidades nulas, representando uma situação de preamar. Esta condição inicial é evidentemente uma aproximação grosseira da realidade, por isso foi necessário realizar a partir desta uma simulação prévia para o escoamento entrar em regime. Pelas dimensões e características do domínio modelado, é de se esperar que o escoamento entre em regime, a partir do 2º ciclo de maré [Rosman, 1999]. O resultado final desta simulação, ou seja, a elevação do nível d'água ( $\zeta_0$ ) e os componentes da velocidade ( $u_0$  e  $v_0$ ) diferentes de zero, serviram como condição inicial para as próximas rodadas.

O fluxo de entrada (efluxo) de água na BIG e de saída (afluxo) de água da BIG (domínio simulado) ocorre através de um único nó no contorno de terra, os demais nós não recebem nenhum tipo de contribuição. Para o C1 somente o efluxo do rio mambucaba igual a  $27,5 \text{ m}^3$  por segundo, já para o C2 foram utilizados três pontos de afluxo, que correspondem a captação de água para os condensadores de Angra 1, 2 e Angra 3 – CANDU com  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $77 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $77 \text{ m}^3/\text{s}$  respectivamente. Além do rio mambucaba há mais um ponto de efluxo com  $197 \text{ m}^3/\text{s}$  que corresponde ao descarte da água capada nos três pontos acima citados.

Desta maneira, foi prescrito um fluxo normal ao contorno igual a zero em todos os nós do contorno de terra, exceto para aquele em que ocorre a captação ou lançamento de efluentes na BIG.

O passo de tempo utilizado no modelo hidrodinâmico 2DH foi de 90 s, o que representa o melhor desempenho computacional entre a velocidade física e a velocidade numérica – número de Courant, que marca o limite superior do intervalo de tempo utilizado no modelo. Os resultados espaciais e temporais obtidos foram em intervalos de uma hora, para melhor visualização da vazão, onde é possível observar todo o ciclo de maré.

Para se ter uma circulação hidrodinâmica completa foram simuladas marés enchentes e vazantes ao longo de vinte dias que é o tempo necessário para um ciclo completo da maré de sizígia e quadratura, período de translação da lua em torno da terra.

Na Figura 4.2 apresenta-se o domínio simulado. É possível notar, na figura, as fronteiras abertas 1 e 2 que são os limites por onde as marés “entram” e “saem” da BIG. A região destacada em vermelho (Itaorna) chama atenção para o ponto de lançamento do inventário de trítio proveniente do LOCA em Angra 3 – CANDU (C1 e C2), nesta região também estão os três pontos de captação de água para os condensadores de Angra 1, 2 e Angra 3 – CANDU (C2). Há, em Piraquara, a região de descarte da água dos condensadores representado pelo círculo em azul. A região em verde corresponde ao rio mambucaba (C1 e C2).

A circulação na Baía de Ilha Grande depende basicamente das ações das marés e ventos, com menor importância dos rios devido a topografia acidentada, conforme explicado na seção 3.2.4. Por ser uma baía muito rasa, com correntes de maré relativamente fortes e ventos frequentes, os padrões de circulação são predominantemente barotrópicos, apresentando menor influência de gradientes de densidade.

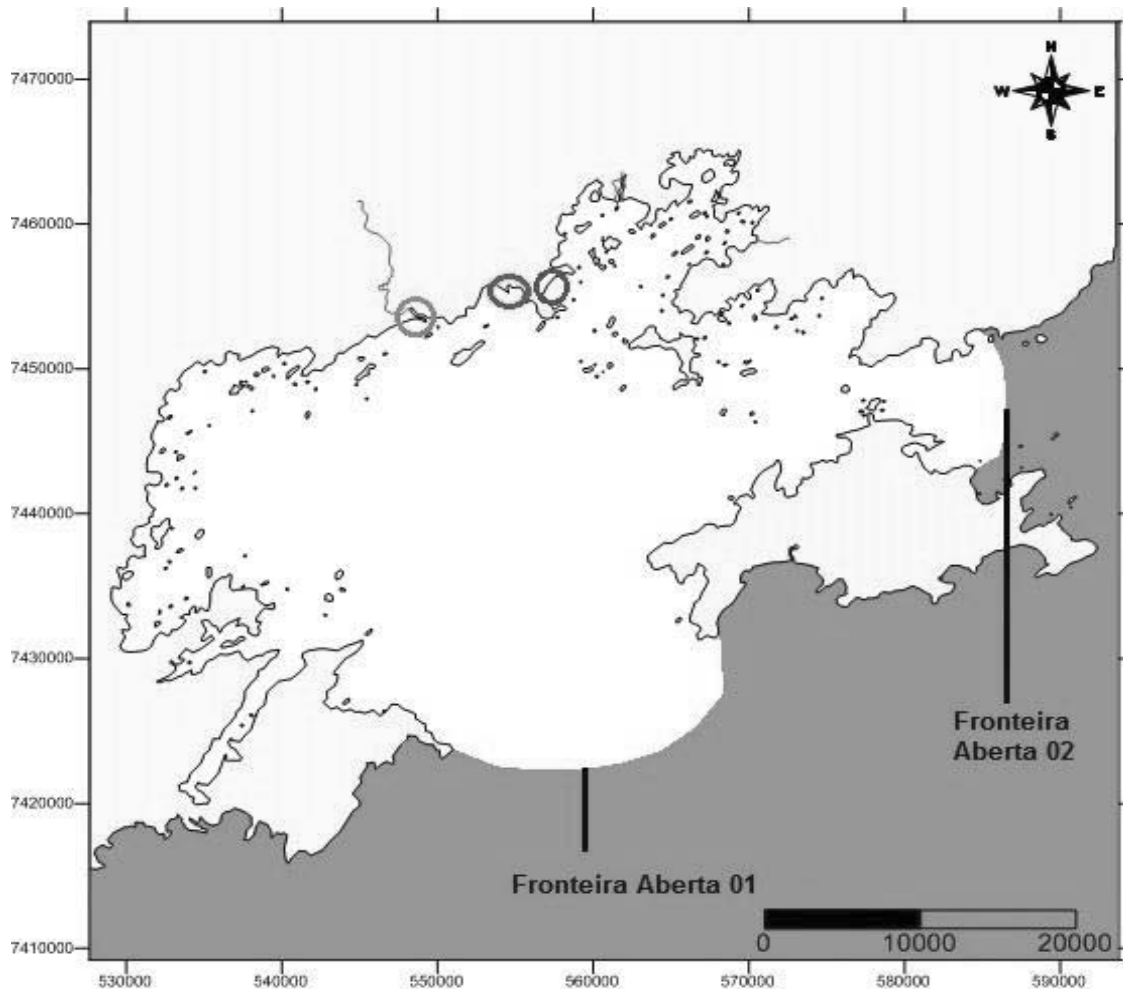


Figura 4.2 – Domínio simulado na Baía da Ilha Grande. Contém a indicação da posição dos fluxos de captação e descarga de águas na fronteira de terra.

Para analisar os cenários considerados (usina parada ou com captação e descarga) na produção de diferenças na circulação a nível local, quanto a magnitude da influência, foram comparados os dados obtidos nos dois cenários para uma estação definida no modelo que se situa na área de influência da operação da central nuclear. As figuras 4.3 e 4.4 mostram a elipse de correntes de maré nessa estação, localizada próxima a Praia de Itaorna, onde teria ocorrido a suposta liberação acidental. As elipses relacionam a intensidade das correntes de enchente e vazante (maré horizontal) em um ponto específico e permitem identificar a direção da corrente resultante em termos médios.

Os cenários concebidos mostram uma acentuada mudança do padrão de circulação de correntes próximo a área da CNAAA, refletindo a recirculação da água em diferentes pontos (captação e descarga) durante a operação das usinas que alcançam uma vazão de cerca de 120 m<sup>3</sup>/s. Tal recirculação elimina por completo a corrente residual originalmente voltada para SW, relacionada ao atrito no fundo e ao coeficiente de deslizamento da costa.

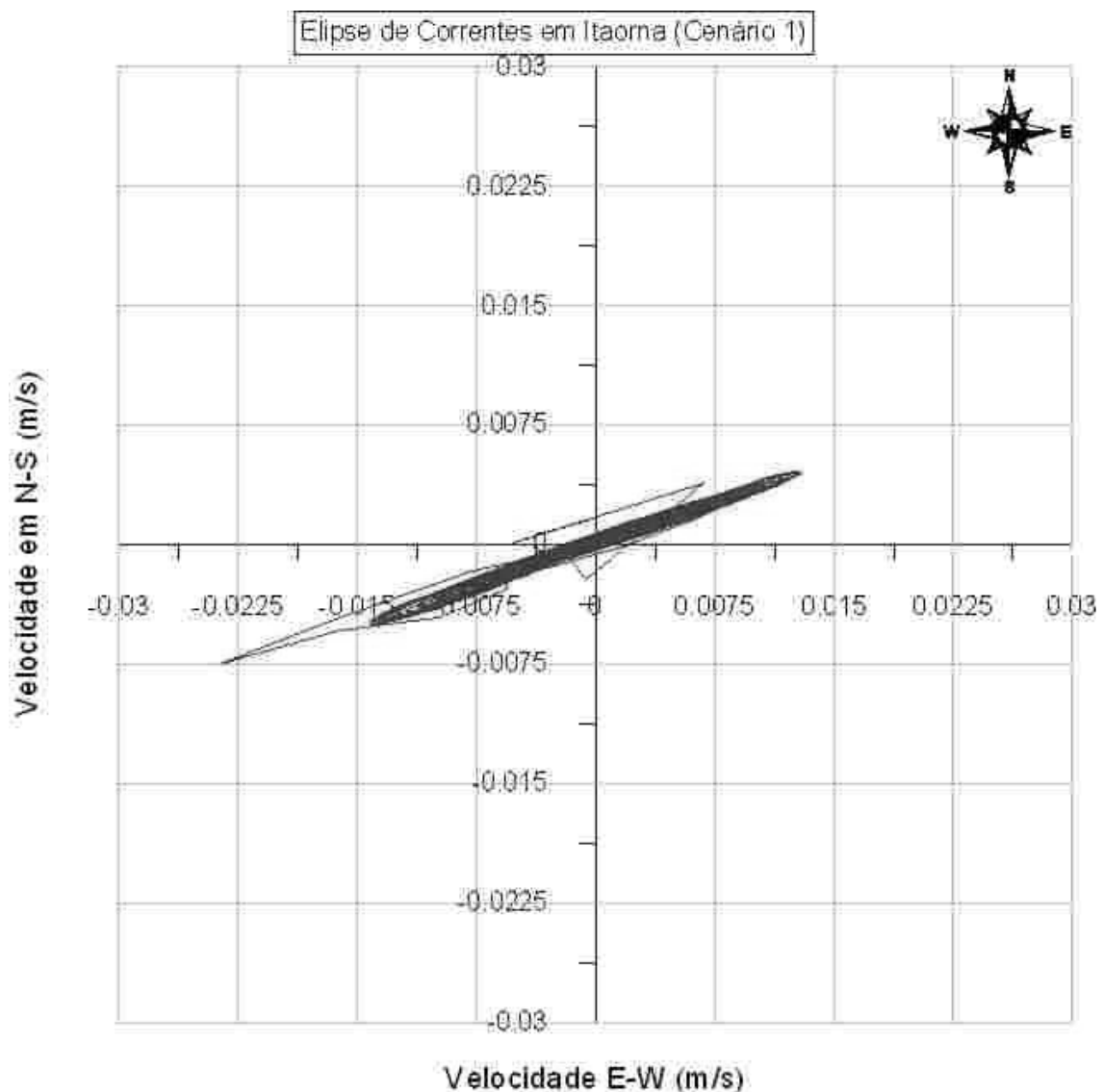


Figura 4.3 – Elipse de correntes de maré na Praia de Itaorna no cenário 1, desligamento da CNAAA. Destaca-se que a corrente residual é para o quadrante SW, com magnitude inferior a 0.01 m/s.

## Elipse de correntes em Itaorna (Cenário 2)

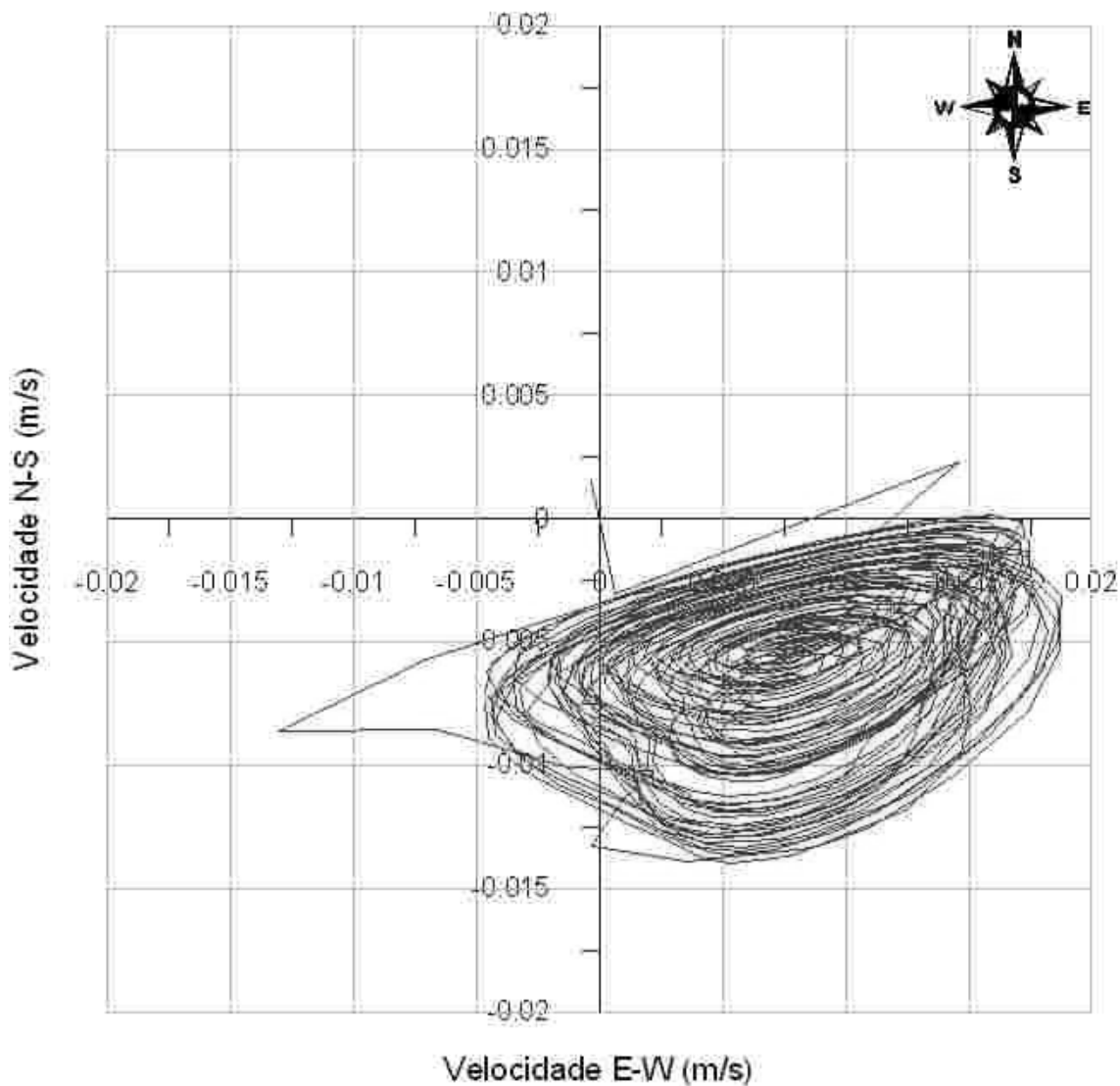


Figura 4.4 – Elipse de correntes de maré na Praia de Itaorna no cenário 2, operação da CNAA (com captação e descarga). Destaca-se o deslocamento da corrente residual para o quadrante sudeste (SE), sem uma tendência definida e com magnitude similar a do cenário 1.

Para uma melhor análise das diferenças dos dois cenários em toda a BIG, observou-se o padrão de correntes médias para os ciclos de maré em condição de quadratura e sizígia. As figuras 4.5 e 4.6 a seguir mostram



padrões de correntes residuais respectivamente durante um dia (~24.7h) de maré de quadratura e um de maré de sizígia para o cenário 1. As figuras 4.7 e 4.8 mostram os resultados obtidos no cenário 2, igualmente para marés de quadratura e sizígia. Destaca-se que as correntes residuais são eulerianas, isto é, médias ao longo do tempo em pontos fixos.

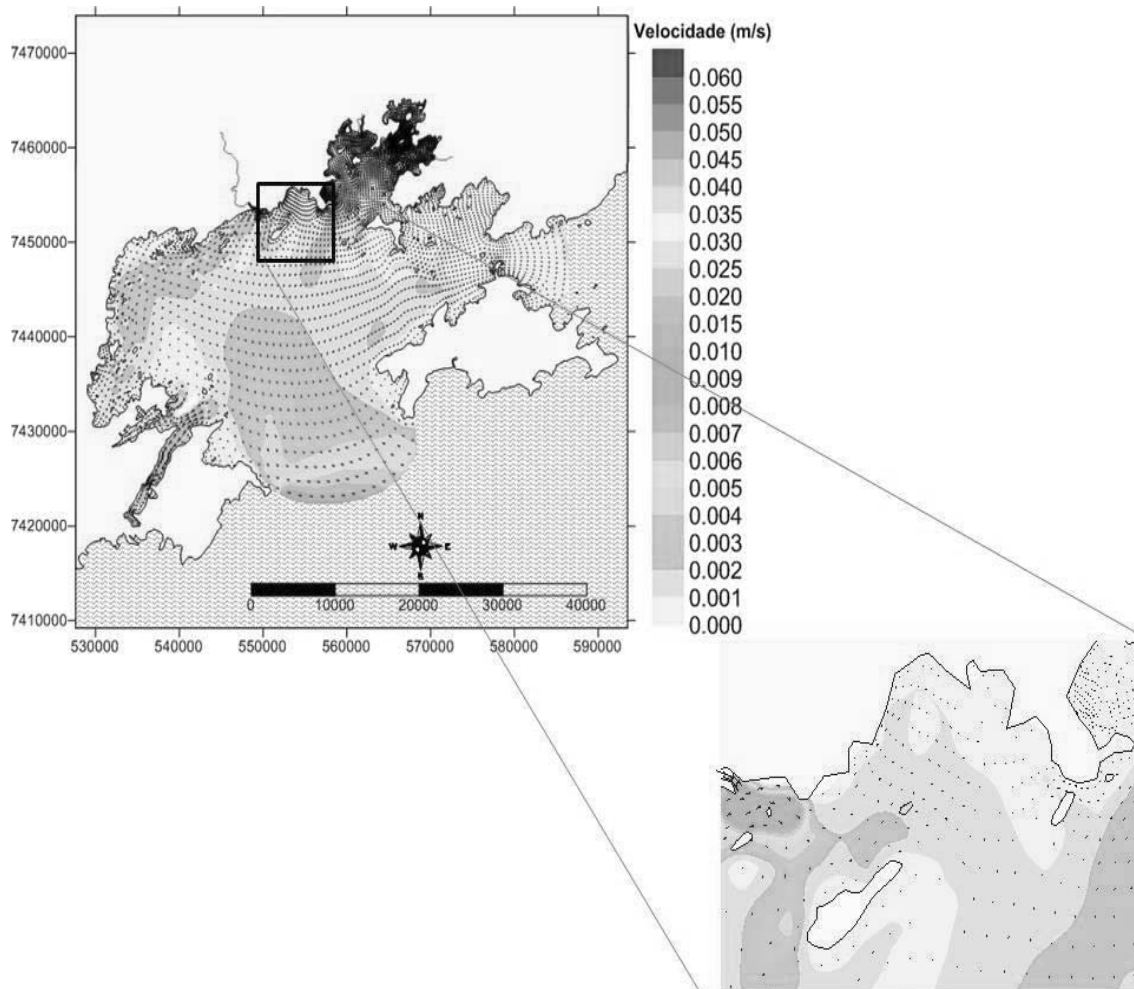


Figura 4.5 – Correntes residuais eulerianas em maré de quadratura para o cenário 1. Corresponde ao período entre 124 e 148 horas.

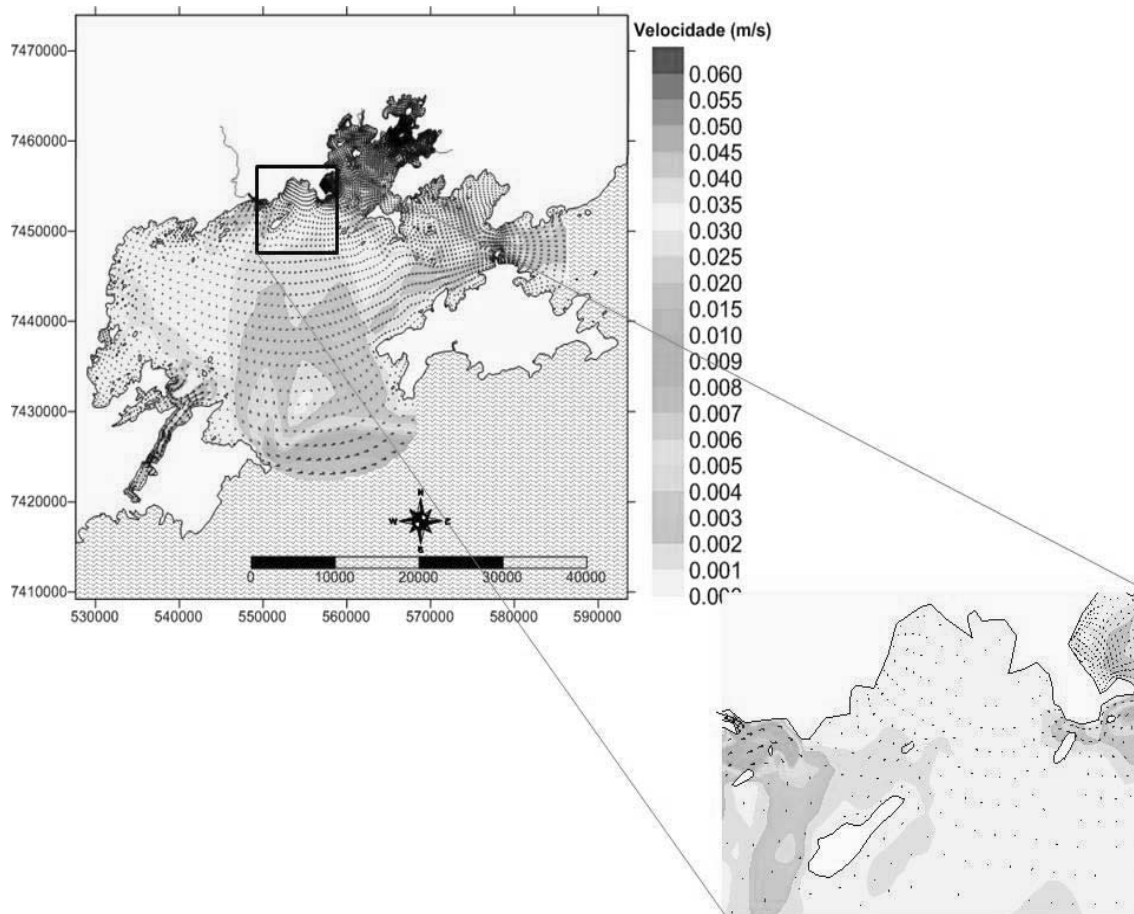


Figura 4.6 – Correntes residuais eulerianas em maré de sizígia para o cenário 1. Corresponde ao período entre 324 e 348 horas.

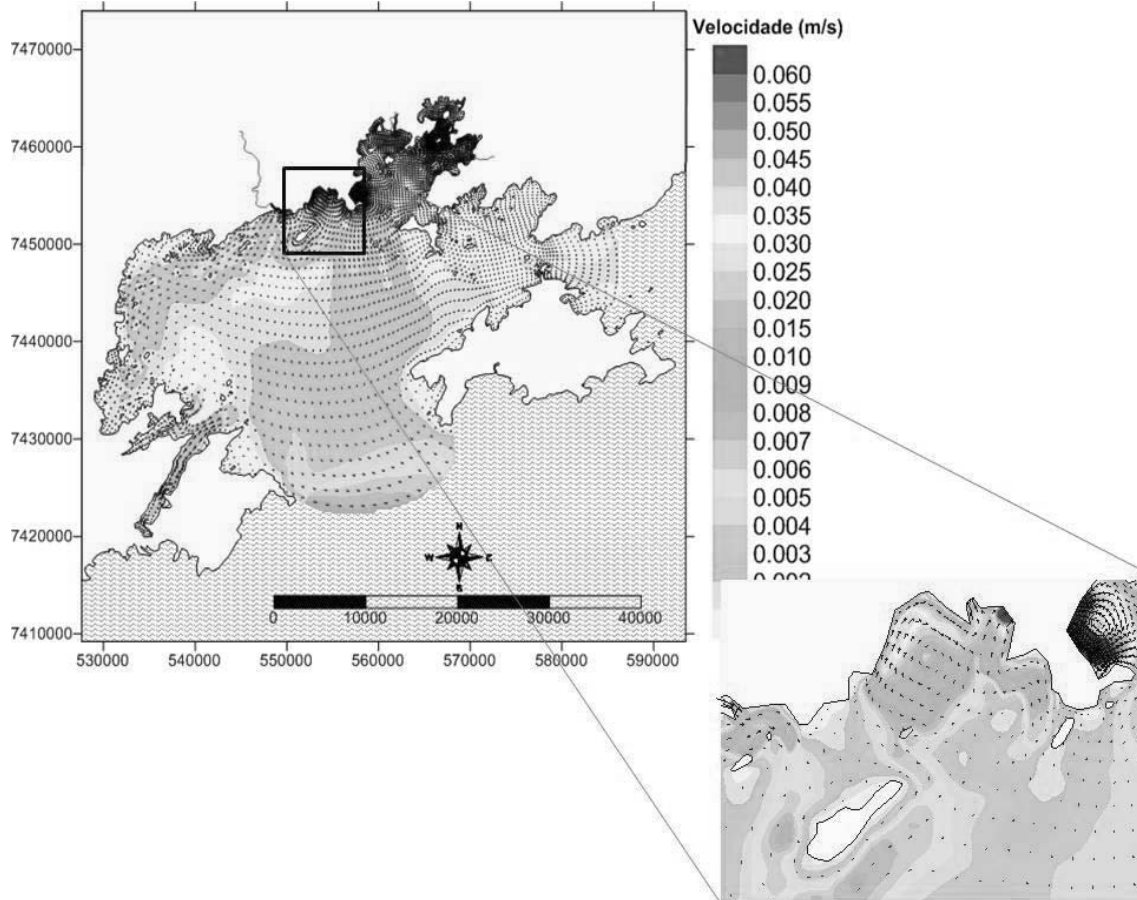


Figura 4.7 – Correntes residuais eulerianas em maré de quadratura para o cenário 2. Corresponde ao período entre 124 e 148 horas.

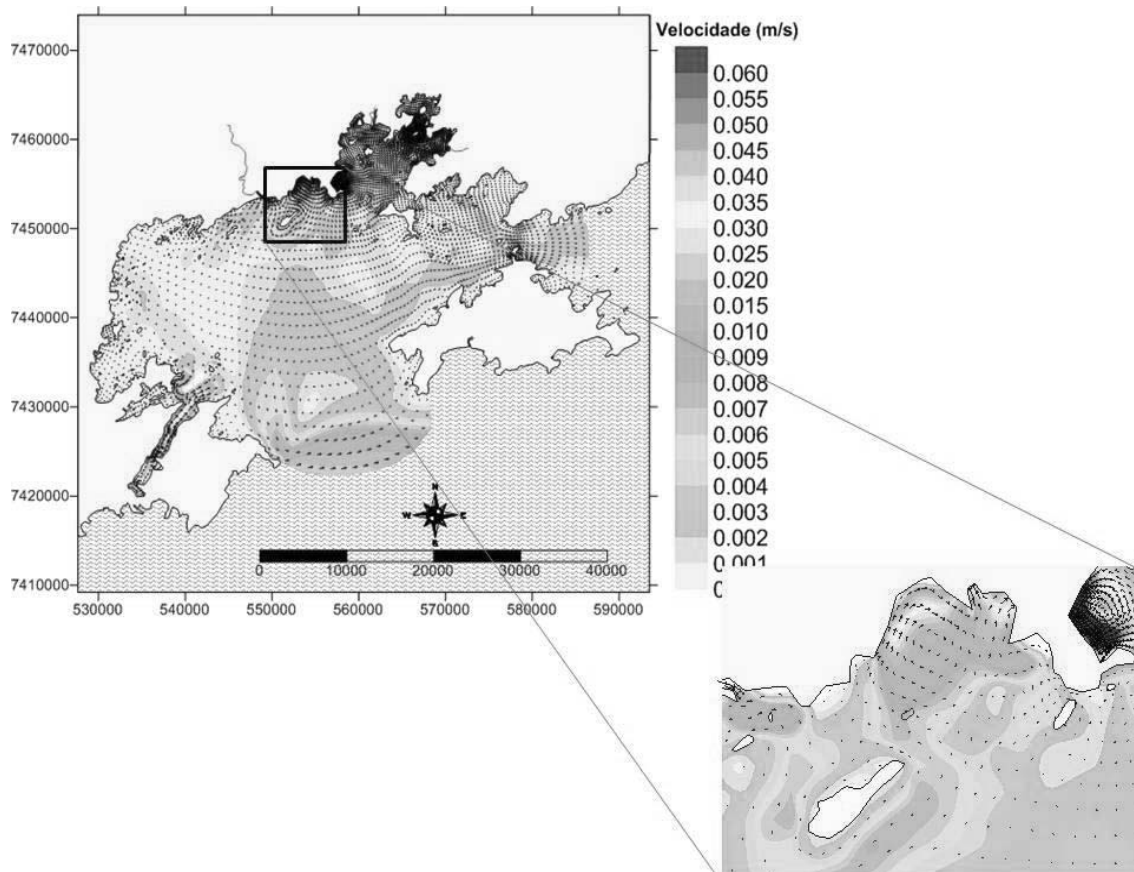


Figura 4.8 – Correntes residuais eulerianas em maré de sizígia para o cenário 2. O dia representado corresponde ao período entre 324 e 348 horas.

A influência da captação e descarga de  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  de água se expressa de forma bastante nítida em todo o estuário. Quando não há essa influência, tanto a Enseada de Itaorna como o Saco de Piraquara de Fora tem velocidades residuais muito reduzidas com resultante sudoeste próximo a praia e recebendo contribuições do Rio Mambucaba originadas a oeste. Considerando a Baía de Ilha Grande como um todo, nesse cenário é possível observar que o campo de velocidades na fronteira aberta 1 se move em efluxo para porção Oeste em condições de quadratura. Enquanto que em maré de sizígia, junto a fronteira aberta 1, ocorre um deslocamento das correntes em direção a Leste, que ao se aproximarem da Ilha Grande mudam sua direção para o interior da Baía e ao interagirem com as correntes vindas do canal de ligação com a Baía de Sepetiba, formam uma grande área de recirculação na porção centro-sul do estuário.

O cenário com captação e descarga, como esperado, muda completamente as correntes residuais na área de impacto, com a formação de um cinturão no campo de velocidades formado na saída do Rio Mambucaba que rodeia toda a Ilha Sandri e segue formando um vórtice desde a Praia Vermelha, passando pela Praia Brava até Itaorna, com uma cauda que se estende desde a extremidade dos contrafortes de Itaorna até a área da CNAAA. Além disso, o Saco de Piraquara de Fora que recebe a descarga de  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  forma um vórtice acentuado junto à linha de costa. No entanto as velocidades deste cinturão não são muito altas, oscilando em geral entre 5 e 20 mm/s e em algumas situações mais localizadas, alcançando valores entre 40 a 60 mm/s.

O aumento da velocidade das correntes na região mencionada acima produz um maior escoamento no efluxo durante a maré de quadratura tal como verificado no campo de velocidades que alcança 2 a 3 mm/s contra valores inferiores a 1 mm/s no cenário 1. A zona de recirculação identificada na maré de sizígia permanece com as mesmas características.

#### **4.3 RESULTADOS DO MODELO DE TRANSPORTE EULERIANO – 2DH**

Após a definição do cenário hidrodinâmico, para o qual a dispersão do radionuclídeo foi simulada, foi preciso estabelecer o cenário de liberação com o objetivo de caracterizar a situação operacional da CNAAA.

Faz-se necessário, para simular a dispersão de trítio no módulo de transporte euleriano 2DH do SisBAHIA, a utilização dos resultados obtidos pelo modelo hidrodinâmico nos dois cenários considerados. Franklin (2001) estudou liberação rotineira de  $^3\text{H}$  e  $^{137}\text{Cs}$  pela CNAAA e concluiu que após cerca de 51 dias a pluma teve suas concentrações estabilizadas (estado estacionário), variando apenas com o ciclo de maré. Contudo, como esse trabalho enfoca um acidente com trítio, foram simulados 365 dias de transporte

na BIG a partir do primeiro dia após o LOCA, com o objetivo de acompanhar a evolução da pluma.

Os resultados de concentração de trítio, após a estabilização do sistema, obtidos por Franklin (2001) foram utilizados como condição inicial de trítio na BIG, com exceção do elemento onde foi postulada a liberação acidental do termo fonte. Para esse elemento foi calculada uma concentração inicial ( $C_0$ ) de trítio em função da diluição da concentração de trítio liberada pela suposta planta CANDU no volume receptor do elemento adjacente a descarga acidental. O volume receptor foi calculado pelo produto da área do elemento e a profundidade ao meio da seção ( $515232 \text{ m}^3 = 109624 \text{ m}^2 \times 4.7 \text{ m}$ ). Tais valores foram obtidos da própria malha de discretização da BIG. Assim, a diluição pode ser obtida pela razão entre o volume receptor e o volume do efluente ( $515232 / 66 = 7807$ ) e a partir daí, podem ser calculados tanto a concentração inicial ( $C^*$ ) e a carga, respectivamente  $68 \text{ GBq/m}^3$  e  $3.7 \text{ TBq/s}$ .

Como o período simulado é de aproximadamente 8 % do tempo de meia-vida do trítio, podemos assumir em uma abordagem conservativa, que não há decaimento no período considerado e também que a sedimentação não ocorre, permanecendo na coluna d'água na forma de HTO.

A opção de se trabalhar com índices de diluição foi fornecer um entendimento claro da distribuição da concentração de atividade em todo o domínio de simulação. O índice de diluição foi calculado a partir da metade do valor da concentração na saída do efluente e, assim, englobou os efeitos da advecção, difusão e dispersão turbulentas envolvidos no fenômeno de transporte descrito anteriormente.

Para ilustrar os resultados obtidos durante o ano de simulação, foram escolhidos os dias  $1^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $7^\circ$ ,  $14^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $365^\circ$  conforme apresentado através da seqüência de figuras apresentadas abaixo. A Tabela 2 mostra os índices de diluição das concentrações de trítio adotadas na confecção das escalas que constam nas figuras.

Tabela 2 – Valores adotados na confecção das figuras de distribuição da concentração em atividade de trítio, com os índices de diluição associados.

Concentração de $^3\text{H}$ (Bq/m <sup>3</sup> )	Magnitude da Fonte	Índice de Diluição (C*/C <sub>0</sub> )
1.00E+10	100	1
1.00E+09	10	0.10
1.00E+08	1	0.01
1.00 +07	0.1	0.001
1.11E+06	0,011	0.00011
5.00E+05	0.005	0.00005
1.00E+05	0.001	0.00001
5.00E+04	0.0005	0.000005
1.00E+04	0.0001	0.000001
5.00E+03	0.00005	0.0000005
1.00E+03	0.00001	0.0000001

Os resultados obtidos através do modelo de transporte euleriano apresentam um padrão evolucionário de acordo com as marés, como esperado. Esse comportamento era esperado, pois a pluma esteve completamente dissolvida na coluna d'água, e com quantidade de movimento neutra em relação ao corpo d'água receptor. Assim os principais mecanismos responsáveis pela dispersão de trítio na BIG foram a advecção hidrodinâmica da BIG, que o transporta em conjunto com o movimento das massas d'água e a difusão turbulenta do trítio devido aos vórtices gerados por tensões de atritos internos na massa d'água, tensões de atrito com o fundo e atrito de vento na superfície livre.

A seguir vamos mostrar as figuras relativas à dispersão de radionuclídeos causada por um acidente do tipo LOCA em um reator CANDU situado no sítio de Angra 3, para os cenários 1 e 2.

Apresenta-se nesta seção os resultados relevantes que mostram a dispersão na Baía de Ilha Grande da liberação acidental de trítio, no período entre 24 horas e 1 ano decorrido do acidente (LOCA). No fim do primeiro dia após o acidente (situação de preamar de sizígia), podem ser observadas atividade máxima de  $1 \text{ TBq/m}^3$  de trítio junto a Praia de Itaorna (diluição 1:10), porém em uma área bastante limitada (Figuras 4.9 e 4.10). Isso ocorre porque as velocidades locais são relativamente baixas e assim a pluma se restringe a vizinhança da fonte, chegando até as proximidades da Ilha Sandri com atividades que variaram entre o valor máximo e  $1 \text{ KBq/m}^3$ . A diluição variou de 1:10 próximo a Praia Brava até 1:10,000,000 próximo a Ilha Sandri.

No 3º dia de simulação, em situação de baixa mar de sizígia, a pluma se apresenta bem mais espalhada do que no 1º dia. Pode -se observar (Figuras 4.11 e 4.12) que a mesma moveu-se predominantemente para Sul e Sudoeste em direção a fronteira aberta 1, atingindo o centro da BIG com uma diluição entre 1:100,000 e 1:1,000,000 a um raio de aproximadamente 15 km da fonte. Esta aceleração do transporte deveu-se ao fato da pluma de trítio ter encontrado correntes de maior velocidade em direção ao centro da Baía. Entretanto, as maiores concentrações de atividade, próximas a fonte, não ultrapassam  $10 \text{ GBq/m}^3$ , com diluição de 1:1,000. A exportação de trítio é muito limitada.

A pluma no 7º dia de simulação, em condição de preamar de quadratura, que ao terceiro dia alcançava apenas até as proximidades da Ilha da Gibóia, chega então a entrar na Baía da Ribeira a nordeste, no canal de ligação com a Baía de Sepetiba a leste e nas porções mais abrigadas da enseada de Parati e do saco de Mamanguá a oeste (Figuras 4.13 e 4.14). A maior parte da Baía encontra-se com pluma diluída em 1:100,000, sendo que as maiores concentrações de atividade alcançam o valor de  $1,1 \text{ GBq/m}^3$  (diluição de cerca de 1:10,000) ocupando um eixo de cerca de 6 km no sentido NE-SW a partir da fonte. Pode-se afirmar que se inicia a exportação de trítio para outras áreas



costeiras fora do domínio de modelagem, exclusivamente pela fronteira aberta 1, onde observa-se valores de 10 KBq/m<sup>3</sup>.

Ao final do 14<sup>o</sup> dia, em situação de meia-maré enchente de sizígia, observa-se um incremento acentuado na diluição da pluma, que alcança quase integralmente todo o domínio de modelagem. As figuras 4.15 e 4.16, mostram que o trítio se dispersou por toda a BIG, apresentando-se na mesma faixa de concentração de atividade na maior parte da mesma (100 KBq/m<sup>3</sup>), que corresponde a mesma diluição média de 1:100,000, porém com maior espaçamento entre as isolinhas. Essa homogeneização está relacionada principalmente a onda de maré estacionária que alcança as maiores velocidades no momento de meia-maré, que ocorre logo após as estofas de preamar e baixa-mar. A exportação de trítio continua a ocorrer apenas pela fronteira 1, embora a pluma se aproxime consideravelmente da fronteira aberta 2. O aumento de velocidade no momento de meia-maré vazante, que corresponde ao 14<sup>o</sup> dia de simulação, assim como as diferenças entre os dois cenários hidrodinâmicos considerados respondem pelo comportamento observado da pluma.

A dispersão de trítio nos dois cenários considerados, foi bastante similar na Baía como um todo. As diferenças se fizeram sentir entre o 3<sup>o</sup> e o 14<sup>o</sup> dia (Figuras 4.11 a 4.16), período em que a pluma com concentrações mais elevadas de trítio alcançou distribuição máxima superior a 10 km de diâmetro. No cenário 2, com operação de bombeamento e descarga, a área ocupada por tais concentrações diminuiu mais rapidamente. Observou-se que isso se deu a partir do momento em que as concentrações máximas alcançadas no 3<sup>o</sup> dia experimentaram a diluição observada nos dias 7 e 14, a qual foi mais rápida no cenário 2 (Figuras 4.12, 4.14 e 4.16) que no cenário 1 (Figuras 4.11, 4.13 e 4.15). Isso refletiu uma maior diluição da pluma devido a retirada de grande volume de água contaminada na área do acidente e liberação subsequente no Saco de Piraquara de Fora. Por isso, a partir do 11<sup>o</sup> dia houve redução das concentrações da pluma enquanto que, no cenário 1, tal fato só foi verificado a partir do 15<sup>o</sup> dia. Assim, um eventual aumento do bombeamento dessas águas poderia ser utilizado no processo de intervenção para acelerar a diluição da

pluma. No entanto, essa operação só é efetiva no controle das concentrações mais elevadas, não tendo mostrado nenhuma diferença significativa na distribuição geral da pluma de trítio na BIG. Assim, a evolução da mesma é apresentada para os momentos correspondentes ao 30°, 60°, 90°, 120° e 180° dias no cenário 1 (Figuras 4.17 a 4.21).

Ao final do primeiro mês (Figura 4.17) a pluma atinge o seu desenvolvimento espacial máximo na BIG, em situação de meia-maré enchente de sizígia, quando concentrações da ordem de 100 KBq/m<sup>3</sup> (diluição de 1:100,000) podem ser observadas na maior parte da área da baía. Apesar da concentração predominante permanecer a mesma, ocorre uma diminuição acentuada do número e aumento do espaçamento entre as isolinhas que define um padrão de pluma diferente dos anteriores, com tendência a uma ampla homogeneização do sistema. A distribuição das concentrações mostra comportamento assimétrico, onde os mais valores são também os mais freqüentes no domínio. As trocas de trítio alcançam ambas as fronteiras abertas (1 e 2), embora de maneira bastante limitada na fronteira 2, no canal de comunicação com a Baía de Sepetiba. A dispersão da pluma alcançada nesse período, durante outro momento de meia-maré, corrobora a interpretação anterior sobre a influência determinante da velocidade das correntes de maré no transporte de substâncias conservativas no estuário investigado. Tal fenômeno parece ser recorrente em sistemas estuarinos com onda de maré de caráter estacionário.

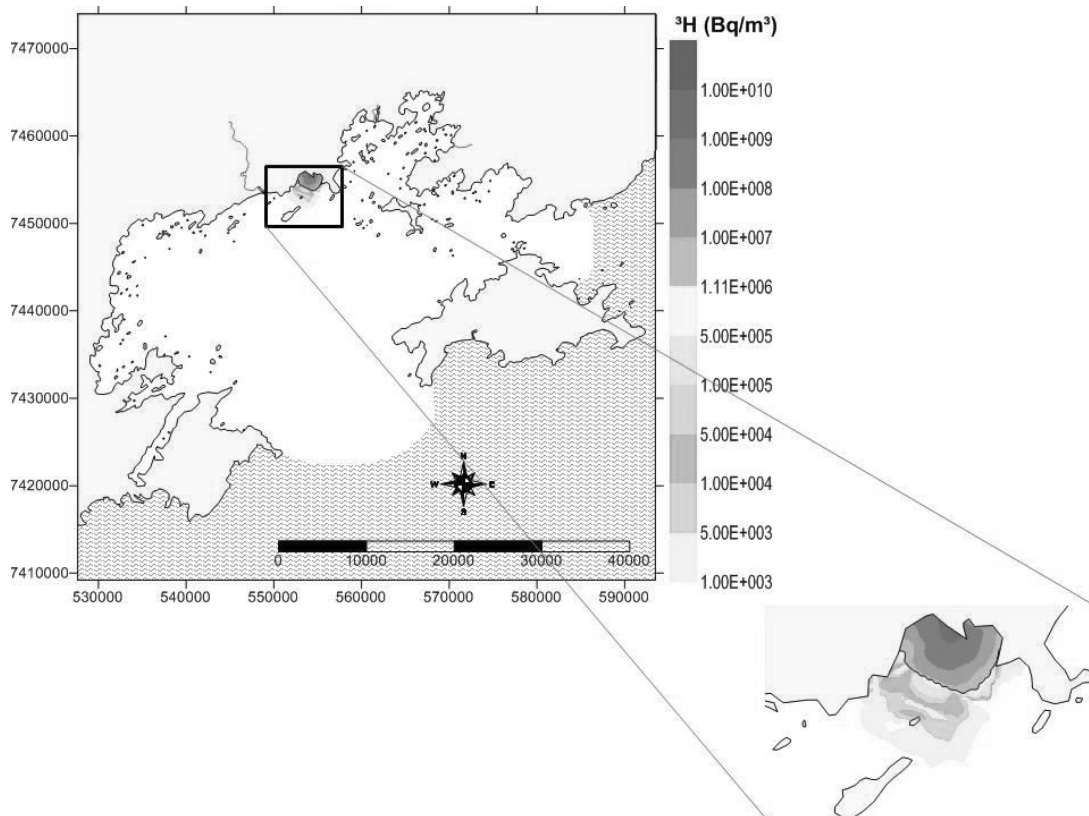


Figura 4.9 – Dispersão da pluma de trítio 1 dia após o acidente no cenário 1.

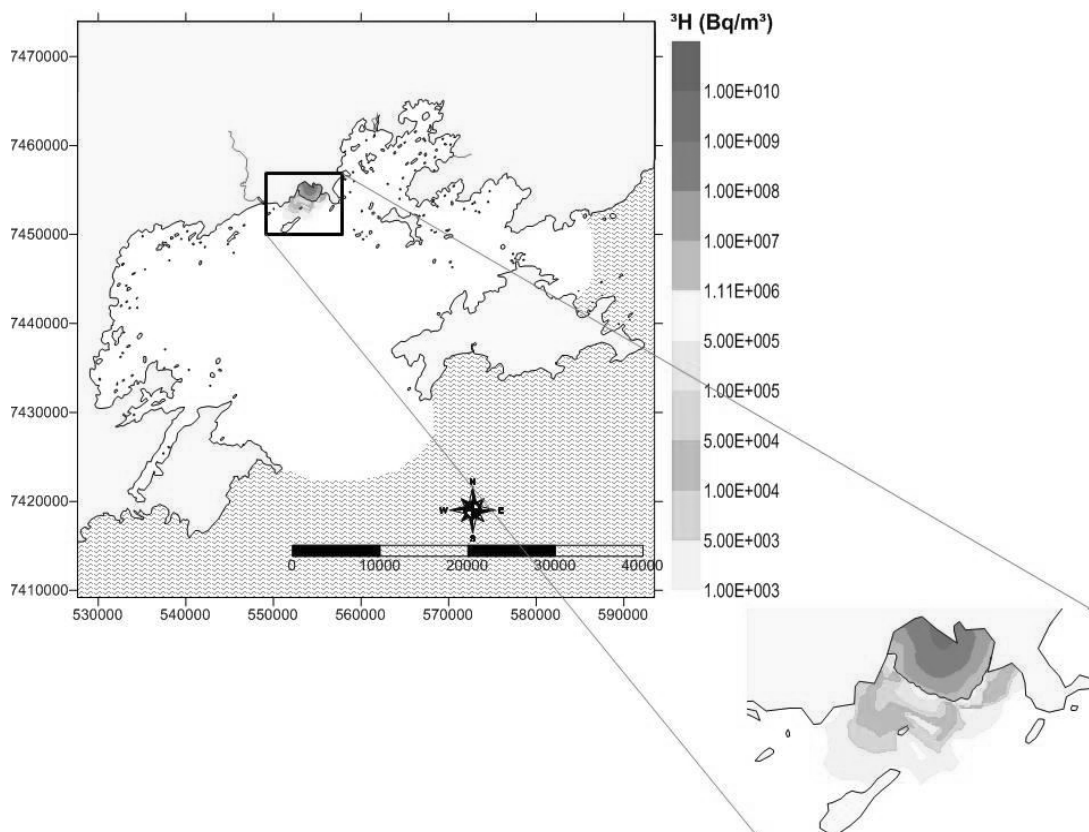


Figura 4.10 – Dispersão da pluma de trítio 1 dia após o acidente no cenário 2.

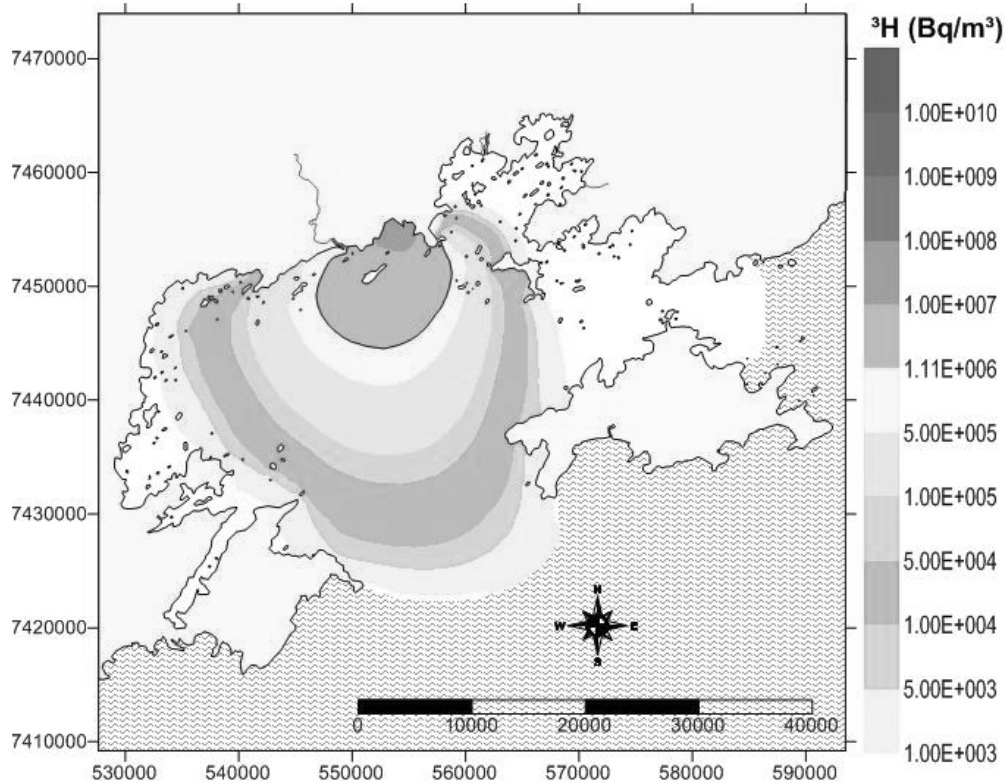


Figura 4.11 - Dispersão da pluma de trítio 3 dias após o acidente no cenário 1.

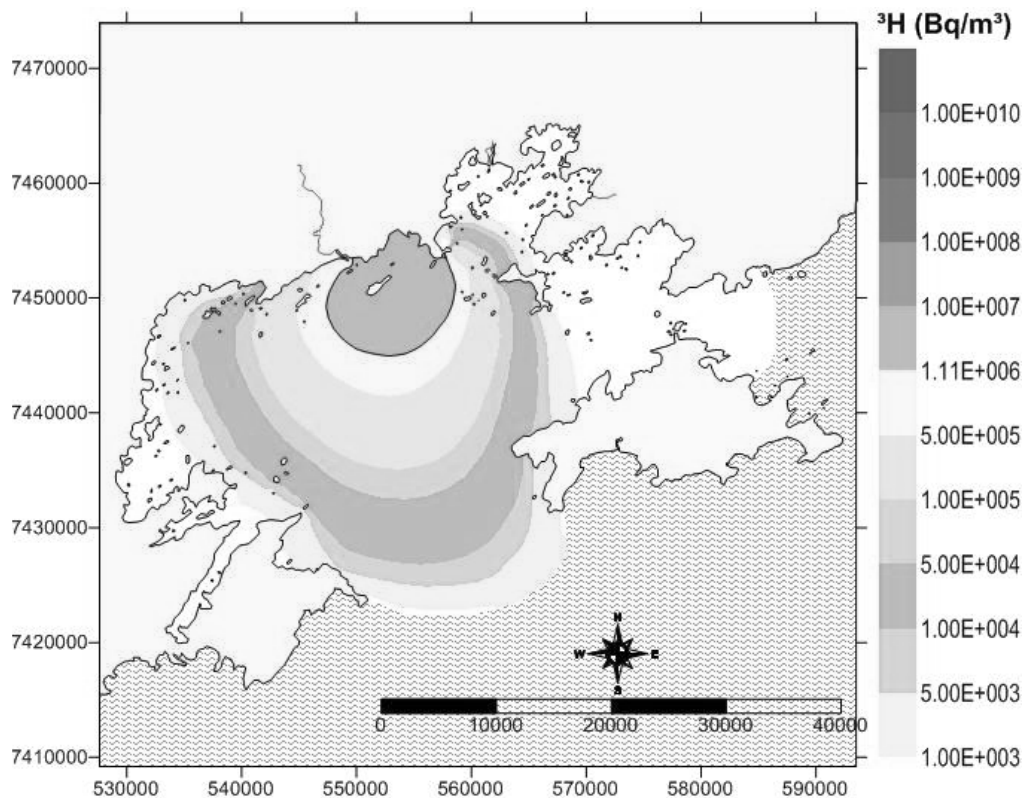


Figura 4.12 – Dispersão da pluma de trítio 3 dias após o acidente no cenário 2.

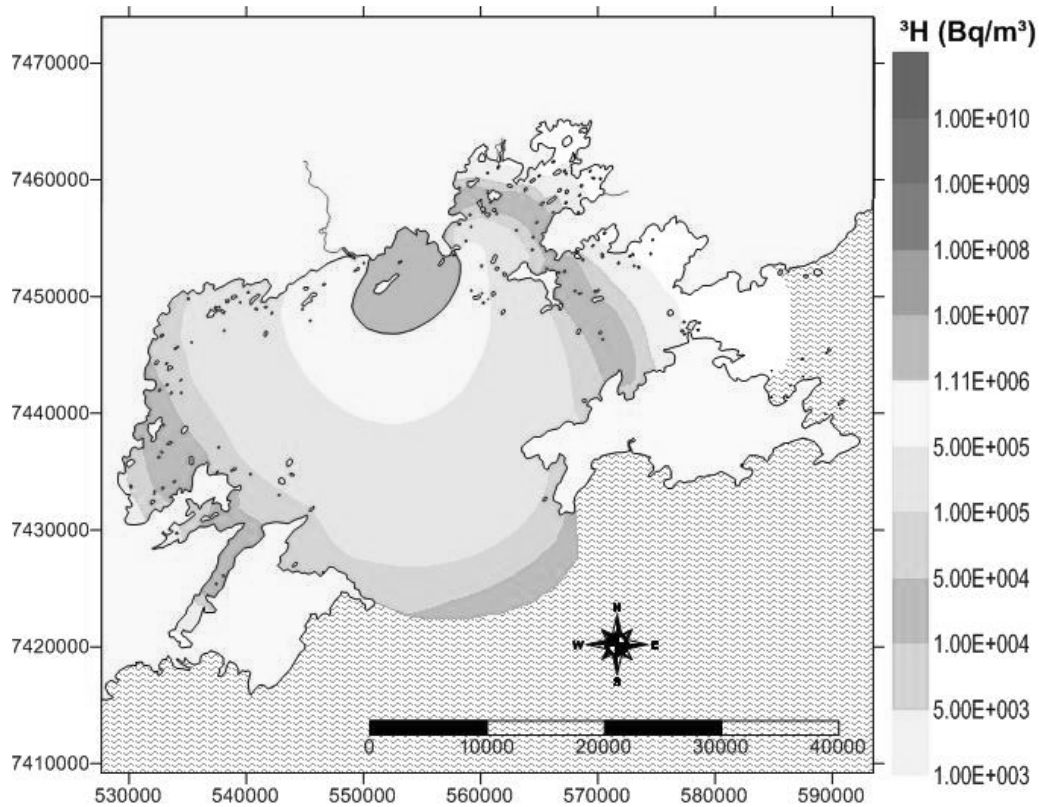


Figura 4.13 – Dispersão da pluma de trítio 7 dias após o acidente no cenário 1.

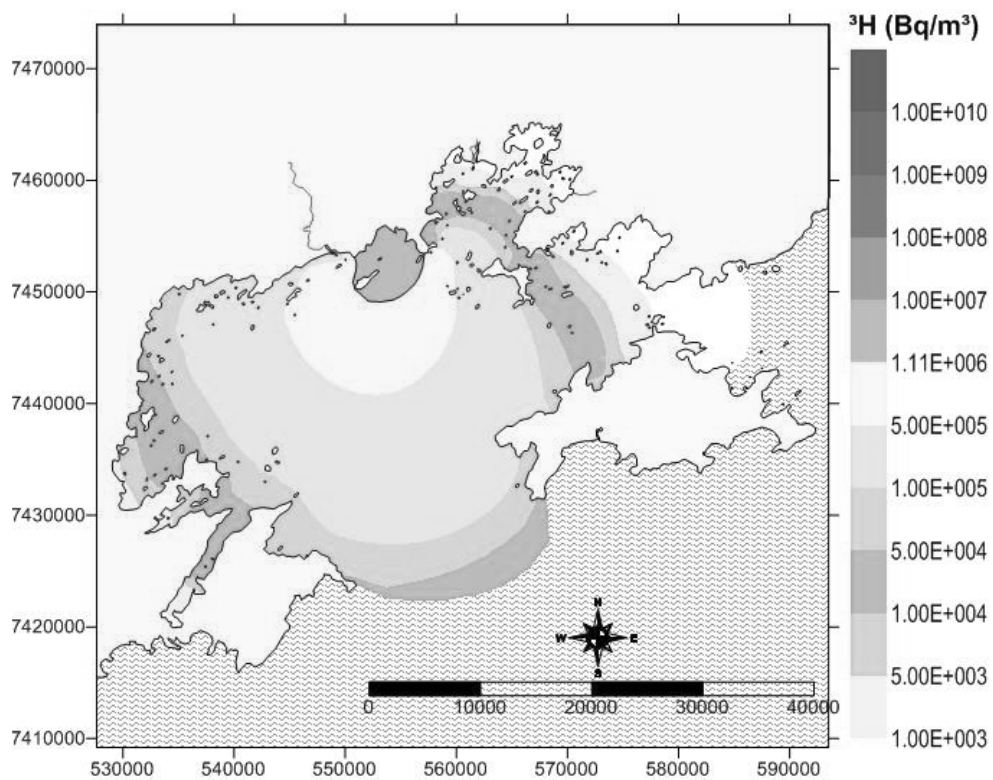


Figura 4.14 – Dispersão da pluma de trítio 7 dias após o acidente no cenário 2.

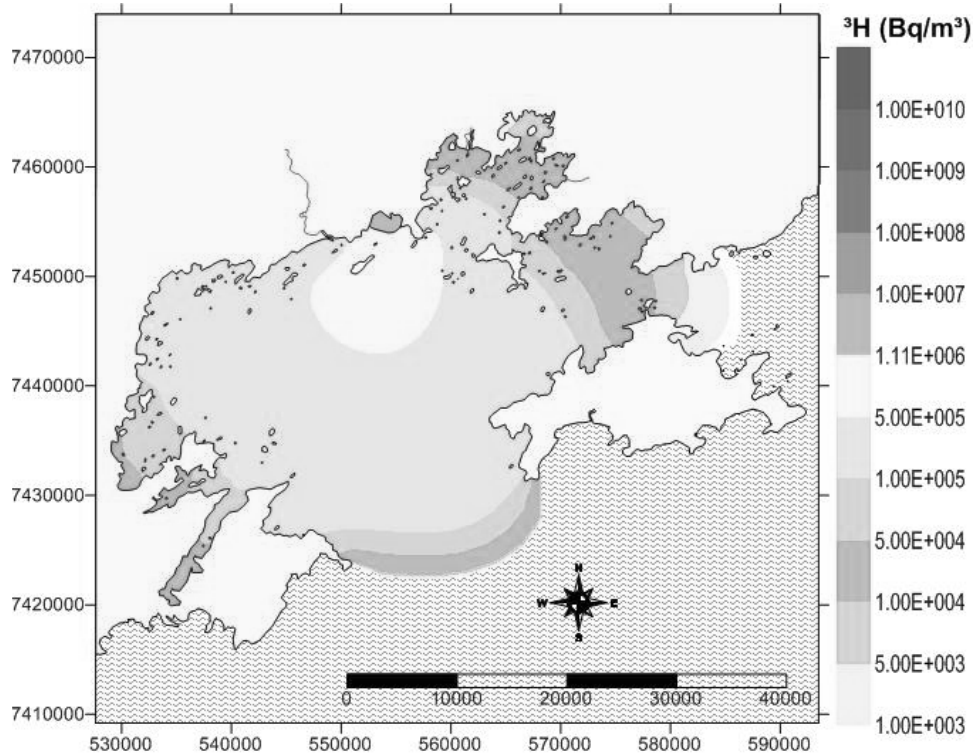


Figura 4.15 – Dispersão da pluma de trítio 14 dias após o acidente no cenário 1.

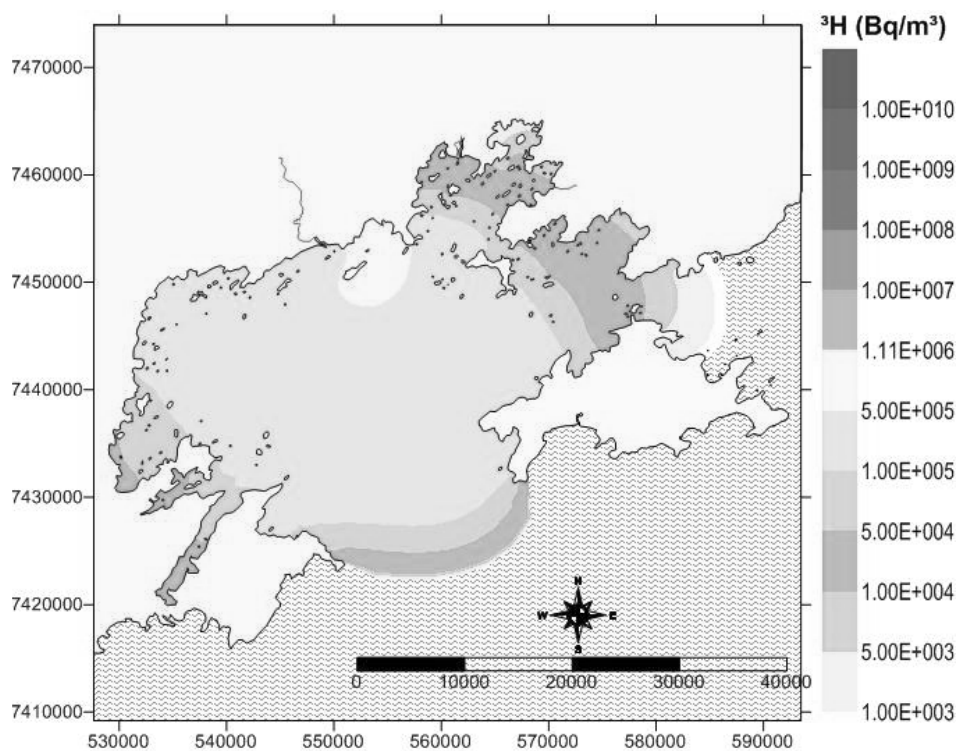


Figura 4.16 – Dispersão da pluma de trítio 14 dias após o acidente no cenário 2.

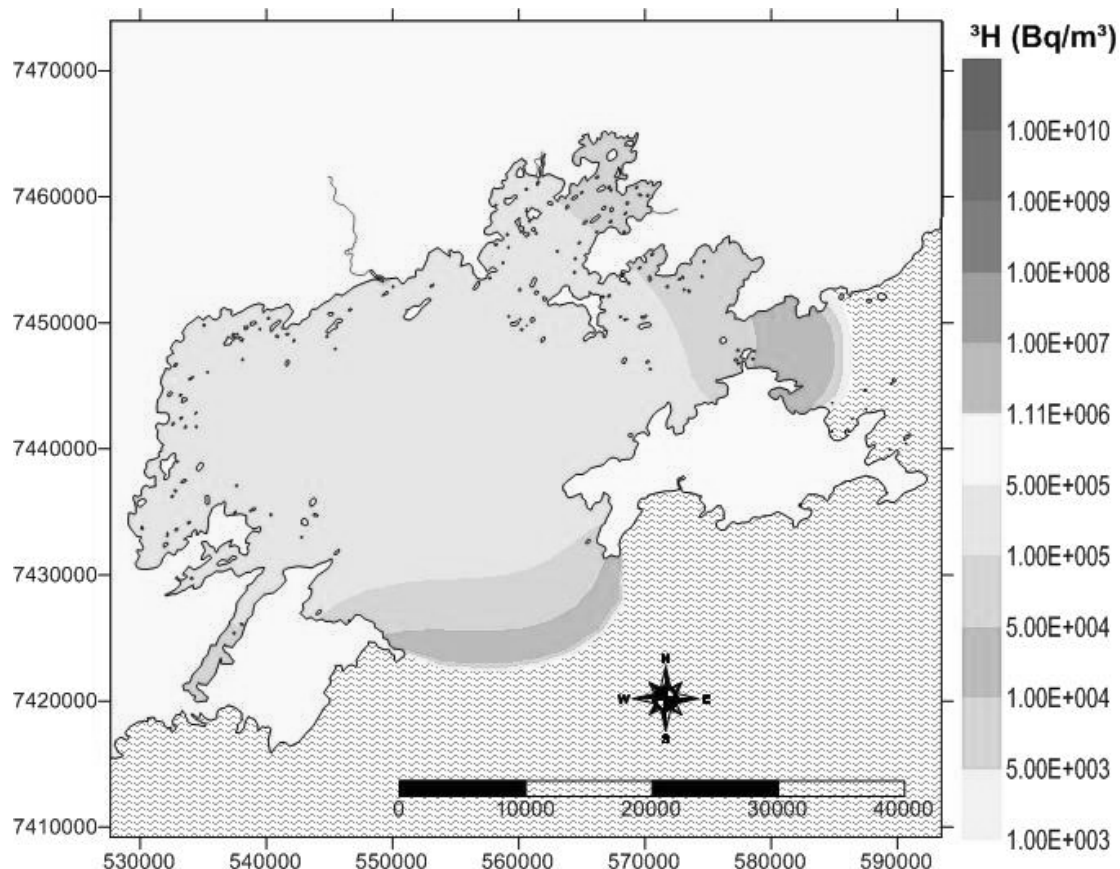


Figura 4.17 – Dispersão da pluma de trítio 30 dias após o acidente.

A diluição mostrou aumento após 60 dias do acidente (em condição de baixa-mar de sizígia), seguindo a mesma tendência observada a partir de 30 dias, resultando na homogeneização progressiva da pluma de trítio (Figura 4.18). A mesma, apresenta na maior parte da Baía uma diluição de 1:200,000, em que pese o fato de manter os mesmos valores vistos anteriormente na Baía da Ribeira (100 KBq/m<sup>3</sup>). Ressalte-se que em condição de meia-maré enchente as porções mais abrigadas da Baía da Ribeira já se apresentavam com a diluição característica após 30 dias. Isso possivelmente se deve a amplificação dos vórtices na entrada da Ribeira, devido ao aumento da velocidade da corrente, retendo parte a pluma que assim não alcançou as enseadas interiores da Baía.

A Figura 4.19 mostra que a dispersão do trítio na BIG, após 90 dias do acidente (em condição de baixa-mar de sizígia) continua a seguir o padrão observado a partir de 30 dias. As isolinhas largamente espaçadas e a homogeneidade da pluma passam a dominar o padrão de transporte, sendo que a BIG já se apresenta, com exceção da Baía da Ribeira, com valor de concentração de atividade abaixo da atividade mínima detectável de acordo com o limite de detecção (LD) das técnicas de medida utilizadas pelo operador ( $11 \text{ KBq/m}^3$ ). Esse valor corresponde a uma diluição de 1:1,000,000 na BIG, que cai para 1:200,000 na Baía da Ribeira e sobe para 10,000,000 junto as fronteiras abertas 1 e 2. Comparando-se com os resultados obtidos por Franklin (2001) os valores predominantes na BIG correspondem a mesma ordem de grandeza dos encontrados no Saco de Piraquara de Fora, local de liberação do efluente no referido estudo.

Após 120 dias (Figura 4.20), a pluma alcança diluição de 1:1,000,000, abaixo do valor do LD para toda a BIG. Após 6 meses do acidente (Figura 4.21), mais uma vez em baixa-mar de sizígia, a pluma já estaria diluída entre 5 e 10 milhões de vezes, o que representa níveis de concentração iguais ou inferiores aos do efluente liberado de forma rotineira, de acordo com Franklin (2001).

Finalmente, um ano após o acidente (Figura 4.22) a Baía de Ilha Grande teria retornado a condição original, quando as concentrações de trítio seriam da mesma ordem de grandeza daquelas obtidas pelo estudo de Franklin (2001) para liberações rotineiras de trítio, após alcançar a situação estacionária, com exceção do Saco de Piraquara de Fora (local de descarga do efluente) onde as baixas velocidades limitaram a diluição do termo fonte, de acordo com a autora.



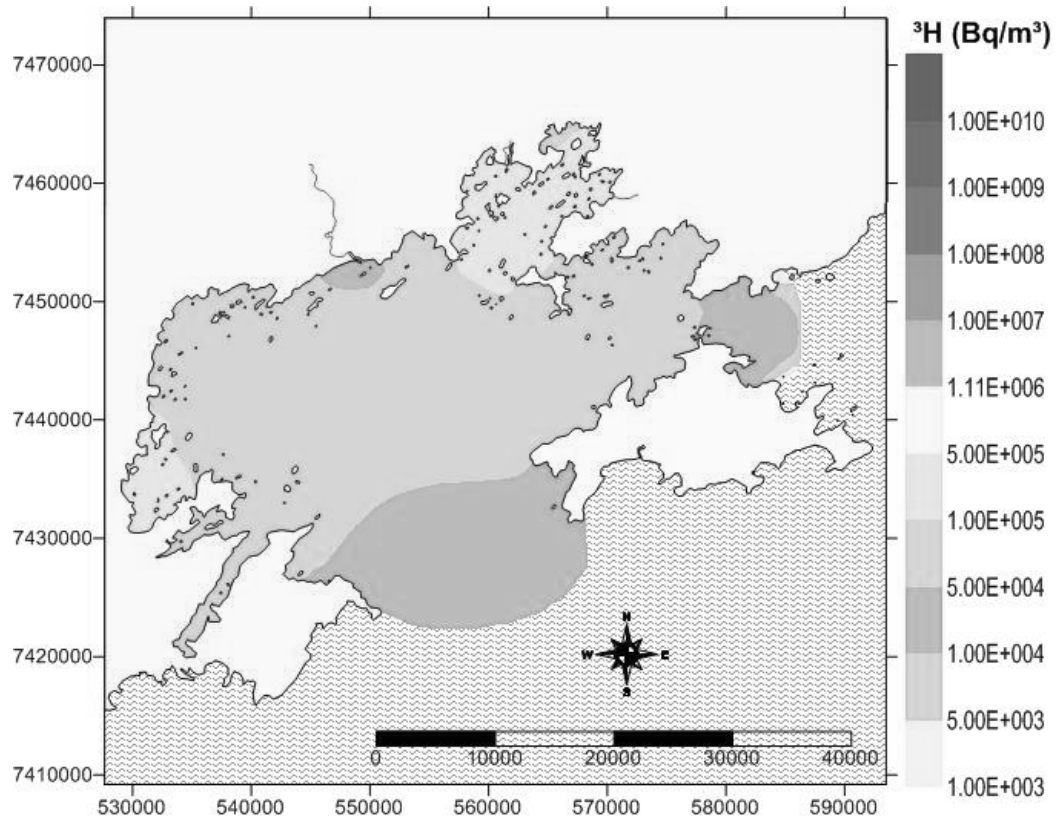


Figura 4.18 – Dispersão da pluma de trítio após 60 dias do acidente.

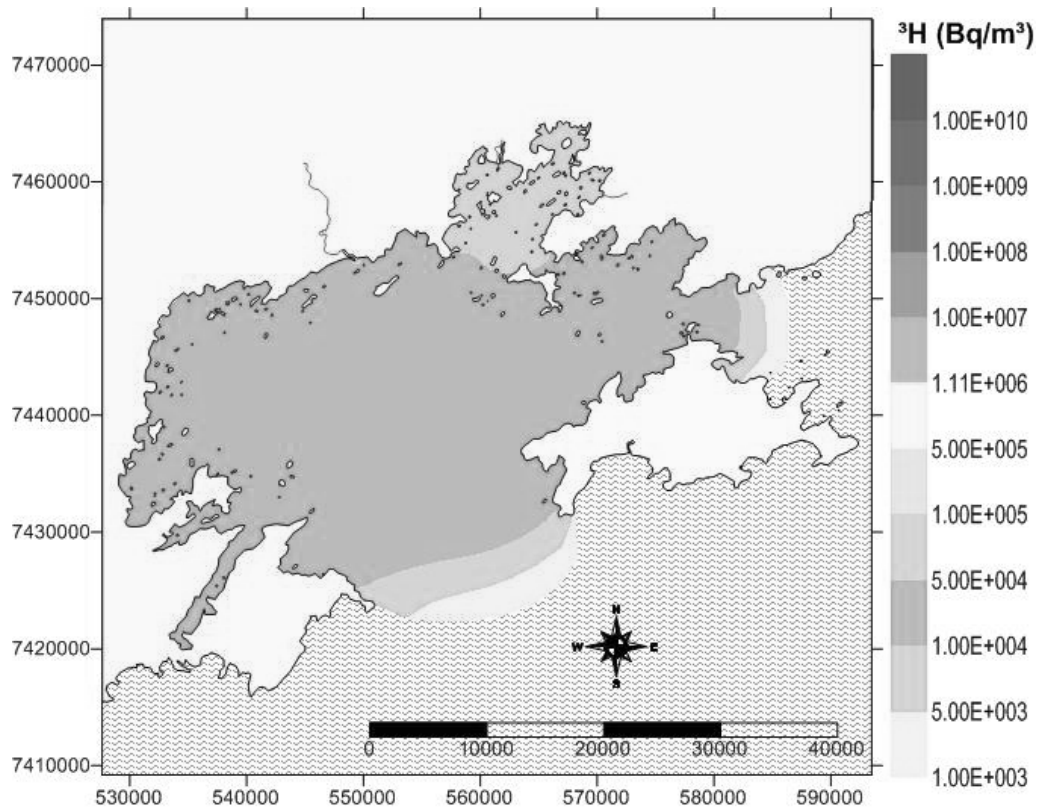


Figura 4.19 – Dispersão da pluma de trítio após 90 dias do acidente.

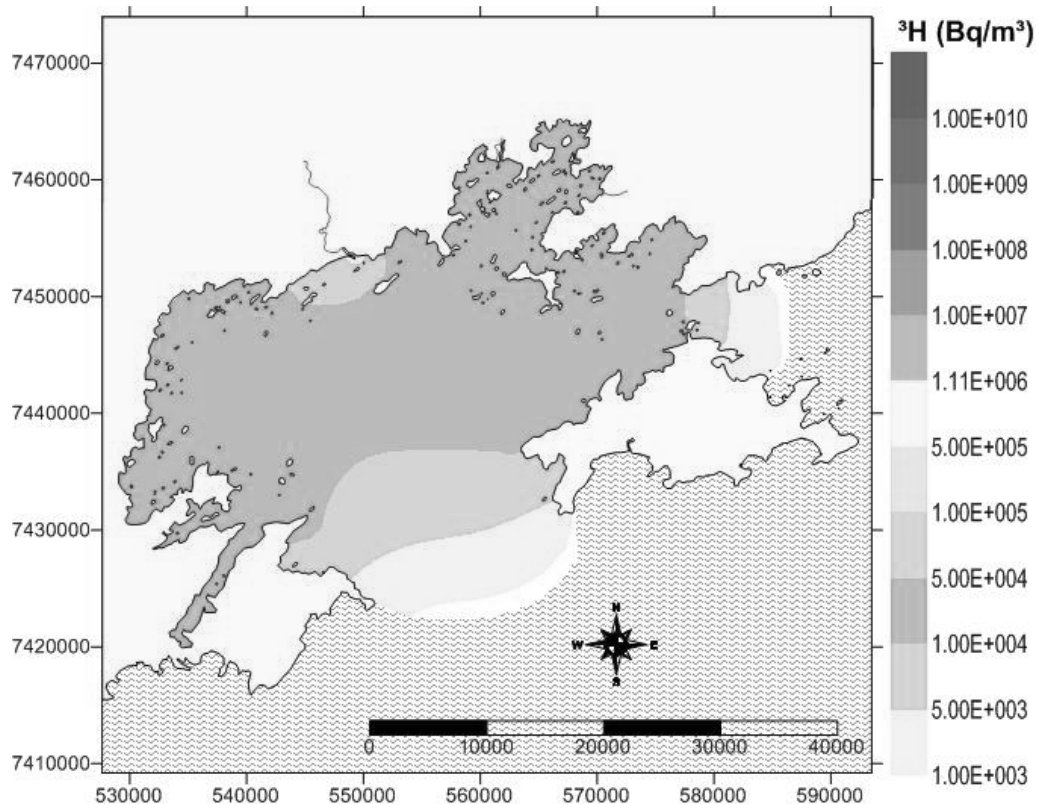


Figura 4.20 – Dispersão da pluma de trítio após 120 dias do acidente.

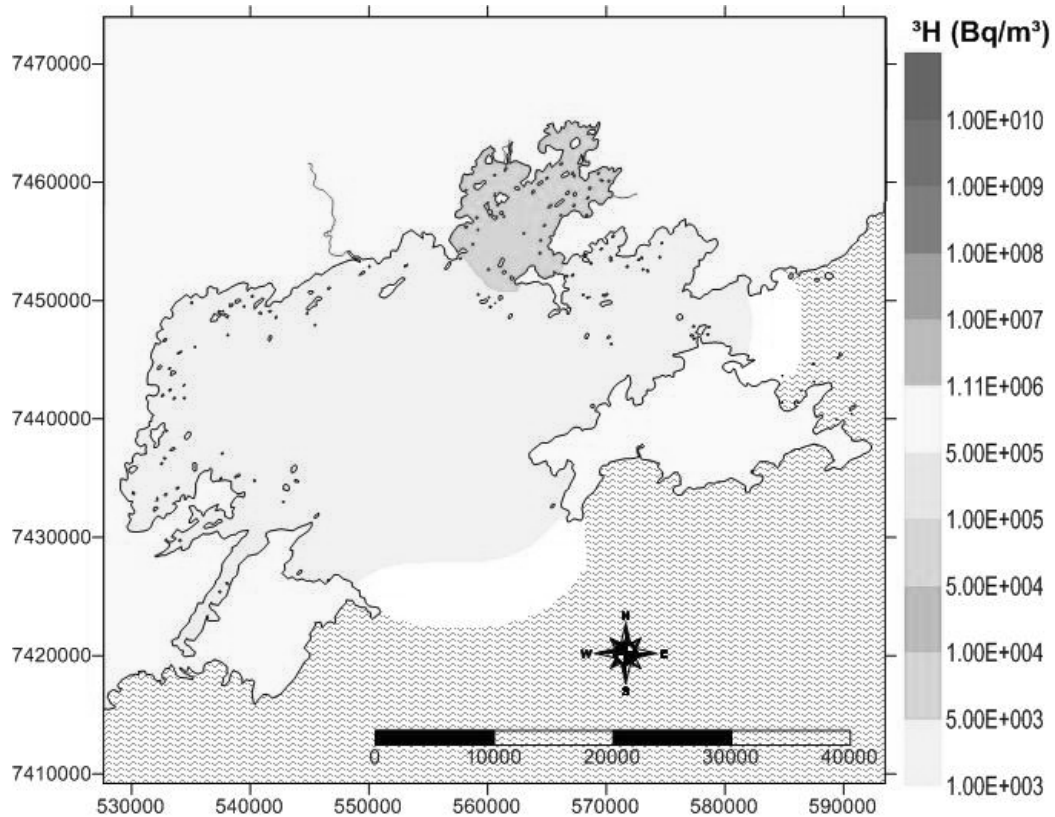


Figura 4.21 – Dispersão da pluma de trítio após 180 dias do acidente.

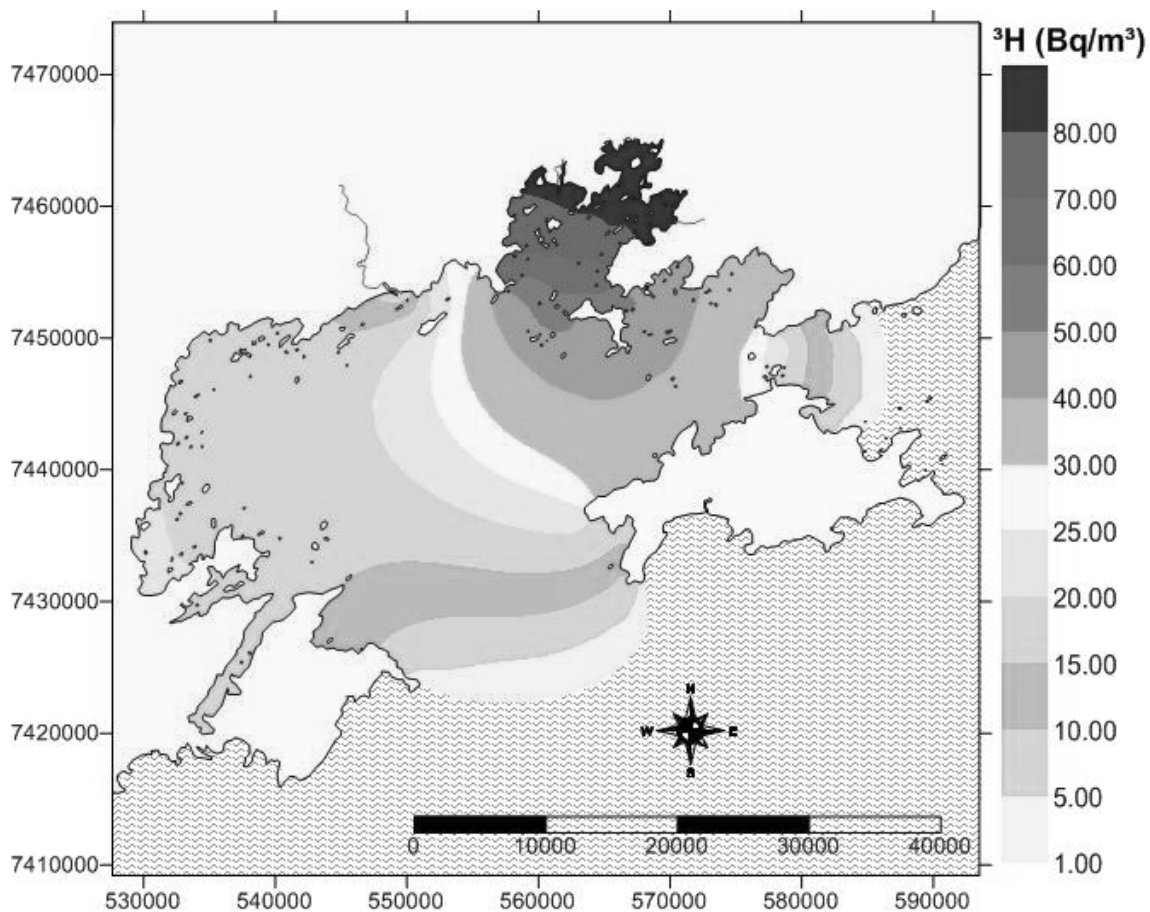


Figura 4.22 – Dispersão da pluma de trítio após 365 dias do acidente.

A comparação entre os dois estudos revela ainda dois aspectos relevantes. A condição de regime de equilíbrio estacionário alcançada no estudo de liberação rotineira não ocorreu nas simulações de liberação acidental. Como o presente estudo trabalhou com uma liberação em batelada (situação de acidente), o modelo de transporte adotado foi o de fonte pontual instantânea, enquanto que o estudo sobre a descarga de rotina trabalhou com um modelo de liberação contínua (fonte pontual contínua) [Halerman, 1987]. Isso explica as diferenças encontradas, uma vez que a liberação contínua tende a entrar em equilíbrio com o regime de marés do estuário que no caso da BIG é de carácter estacionário, devido à manutenção da ligação entre o termo fonte e a dispersão.

Por outro lado, na liberação em batelada perde-se essa ligação e, assim, a diluição progressiva da carga introduzida é um processo dinâmico sem relação com liberações adicionais. Nesse contexto, pode-se afirmar que o modelo de transporte para fontes passivas, adequado para substâncias dissolvidas como o HTO, deve ser escolhido de acordo com a natureza da liberação da mesma. Desta forma, no caso da liberação em batelada, que é uma operação comum no gerenciamento de efluentes em centrais nucleares tanto em situação de rotina como acidental, a melhor solução analítica para a distribuição da concentração é a de fonte pontual instantânea gerada em um tempo  $t=0$  e localizada na fronteira de terra em um sistema de coordenadas cartesiano (malha de discretização) em um fluido de extensão infinita. Assim, a solução adotada no estudo de liberação rotineira não é adequada e a condição de regime estacionário obtida foi possivelmente induzida pela falsa premissa de continuidade da fonte no tempo.

Outro aspecto importante que surge da comparação entre os dois trabalhos é a diferença na velocidade da dispersão da fonte em função do local da liberação do efluente. As liberações rotineiras são no Saco de Piraquara de Fora, enseada abrigada na Baía da Ribeira, enquanto o acidente postulado liberou efluentes diretamente junto as Praias de Itaorna e Brava. O transporte do HTO liberado no acidente foi muito mais rápido não só em função da maior carga liberada, mas em boa medida a ação do transporte advectivo devido a velocidade das correntes nessa região, bem maiores quando comparadas ao outro sítio, especialmente no caso do cenário com bombeamento (C2). Isso mostra que a escolha do sítio de liberação de efluentes foi baseada no conhecimento da hidrodinâmica local e permite minorar o impacto das liberações de rotina. Assim, um sistema de drenagem que fosse capaz de captar qualquer volume de efluentes liberados acidentalmente pela CNAAA, liberando-o junto com o sistema de descarga de rotina, produziria forte atenuação no impacto do acidente sobre a Baía de Ilha Grande como um todo.

#### 4.4 LIMITES DE radioproteção E AVALIAÇÃO DO IMPACTO

Uma vez que a água tritiada (HTO) tenha entrado no corpo, ela se dispersa rapidamente e é uniformemente distribuída nos tecidos moles. Cerca de metade do trítio é excretado em aproximadamente 10 dias após a exposição. Nos EUA, as agências regulatórias nuclear e ambiental (NRC e EPA) estabeleceram três níveis de limites de proteção do público contra o risco potencial a saúde da exposição aos efluentes líquidos radioativos liberados de centrais nucleares. Se as doses do público em geral causadas por liberações acidentais de trítio de plantas nucleares estiverem abaixo dos mais restritivos limites de radioproteção, significa que as mesmas não colocam em risco a saúde do público e a segurança nuclear.

##### **Nível 1: 30 $\mu$ Sv/ano - meta de otimização**

Requer que os operadores das plantas nucleares mantenham as doses dos efluentes tão baixas quanto razoavelmente exeqüível (princípio ALARA) para o público. O objetivo ALARA para liberação de efluentes líquidos, tal como HTO, são doses anuais para indivíduos do público com exposição máxima (grupo crítico) de 30 e 100  $\mu$ Sv, respectivamente para o corpo inteiro e qualquer órgão do mesmo. Este objetivo representa 3 % do limite de dose anual para indivíduos do público de 1 mSv (NRC, 2010a).

Os operadores de centrais nucleares precisam monitorar as liberações autorizadas das suas plantas. Se a mesma exceder metade dos níveis de dose anual previsto dentro de um trimestre, é requerida uma investigação sobre as causas com tomada das ações corretivas apropriadas, reportando-as a autoridade regulatória no prazo de 30 dias após o final do trimestre em que o problema foi identificado.

**Nível 2: 0.25 mSv/ano - meta de padronização**

As plantas nucleares precisam respeitar os limites de dose padrão anual de 0.25, 0.75 e 0.25 mSv, respectivamente para o corpo inteiro, a tireóide e qualquer outro órgão de membros do indivíduo do público. Estes padrões são específicos de instalações do ciclo do combustível nuclear. Esses padrões tiveram como base um estudo da EPA comparando as relações de custo-efetividade de vários limites de dose na redução dos riscos potenciais a saúde da operação dessas instalações. Deve-se observar que a meta de otimização (nível 1) são mais restritivas que os padrões de dose aqui referidos (EPA, 1976).

**Nível 3: 1 mSv/ano - meta global**

O nível final de proteção do público é o limite de dose anual de 1 mSv que se aplica a todos, incluindo instalações de pesquisa, acadêmicas, industriais e médicas que usem material radioativo. Este limite é referendado pela Comissão Internacional de Radioproteção (ICRP) que se baseia no fato de que exposições dessa magnitude ao longo da vida resultam em risco equivalente ao da radiação de fundo causada por fontes naturais (excluindo o radônio). O risco associado a exposições de até 1 mSv por ano é da mesma ordem que o aquele envolvido no uso do transporte público, que é de fácil aceitação pelo público em geral.

Para efluentes líquidos, incluindo HTO, qualquer instalação licenciada pode demonstrar conformidade com o limite de dose de 1 mSv se não exceder os valores de concentração especificados na tabela 2 do apêndice B do documento Padrões para Proteção contra as radiações da NRC ("Standards for protection against radiation" - 10 CFR part 20). Se membros do público ingerirem ou inalarem tais concentrações, durante um ano, a dose total efetiva será de 0.5 mSv, ou seja, metade do limite adotado no nível 3. No caso do trítio, o valor de concentração para liberação de HTO adotado no documento da NRC é de 7,4 Bq/ml (NRC, 2010b).

Além disso, a EPA estabeleceu, através do Ato Federal de Proteção das Águas Potáveis, limites legais para contaminantes na água potável, onde um nível máximo de contaminação na água potável de 40  $\mu\text{Sv}$  por ano para radiação beta e fótons emitidos de radionuclídeos produzidos pelo homem foi estabelecido. Se a contaminação for exclusivamente devido ao trítio, o padrão para águas potáveis é de 2,2 GBq/m<sup>3</sup>, baseado na dose anual de referência. Se outros materiais radioativos similares estão presentes (e.g. <sup>14</sup>C) além do trítio, a soma da dose anual de todos os radionuclídeos não deve exceder 40  $\mu\text{Sv}$  por ano (NRC, 2010c).

Voltando agora para o caso de estudo, as centrais nucleares do Brasil, no que tange a liberação de efluentes seguem os limites de dose previstos nas normas da CNEN, em especial a Norma CNEN-3.01 "Diretrizes Básicas de Radioproteção. Tais limites seguem os dois níveis menos restritivos (2 e 3) do sistema americano (1 mSv e 0.25 mSv), sem a meta de otimização. O limite inferior de 0.25 mSv se refere a um padrão para controle da liberação de materiais radioativos por via de exposição. As principais vias de exposição que são examinadas são: i) exposição externa, ii) inalação de radionuclídeos, iii) deposição no solo com exposição subsequente, iv) ingestão de alimentos marinhos e terrestres. O licenciamento da CNAEA não considerou relevantes as vias de exposição iii) e iv) para casos de liberação acidental [FSAR, 1999], no entanto não foi apresentada qualquer análise sobre a natureza particular do trítio no meio aquático, no caso de acidentes com perda de refrigerante. Na verdade não se dispõe de informação a respeito para os trópicos.

No presente estudo de caso, a exposição causada pela ingestão direta e inalação da água contaminada, deposição no solo e exposição externa pode ser desprezada. Danoso seria o consumo de alimentos do mar que tivessem assimilado HTO da água contaminada, transformando-a em trítio organicamente ligado (OBT) que pode causar sérios danos a macromoléculas, e.g. ácido desoxirribonucléico (DNA), e conseqüentemente a células e tecidos devido à similaridade com o hidrogênio, o que lhe permite tomar parte dos dois mais importantes processos metabólicos, i.e., a fotossíntese e a respiração.

Para se avaliar o impacto radiológico ambiental decorrente da liberação acidental do trítio, é necessário estimar a dose efetiva anual recebida pela população. Faz-se necessário identificar os hábitos alimentares, uso do solo e águas pelas comunidades mais expostas ao radionuclídeo, definindo o denominado grupo crítico ou, nos casos onde isso não for possível deve-se estabelecer o conceito de pessoa representativa, definindo as faixas etárias, além das informações mencionadas acima. Esse é o caso da CNAAA onde foram definidas três faixas etárias (0 – 5, 6 – 15 e 16 – 70 anos) de pessoas representativas. Para situações planejadas, o limite de dose deve considerar todas as fontes potenciais de liberação para o meio ambiente (efluentes líquidos e gasosos) contabilizando a contribuição dos demais radionuclídeos. O limite de descarga para plantas nucleares deve respeitar 0.25 mSv/ano o que representa o objetivo de restrição de dose (de um total de 1 mSv/ano) do sistema de tratamento de efluentes.

No entanto, quando se considera a situação de liberação acidental, tem-se uma condição de emergência em que o objetivo passa a ser reduzir a dose adicional incorrida pelo acidente até um determinado valor ou nível de referência previamente definido pelo licenciamento nas especificações técnicas dos efluentes radioativos. Estes níveis servem como limite máximo permissível, sendo que a ultrapassagem deste limite requer algum tipo de intervenção por parte do operador da instalação. As especificações técnicas se baseiam nos valores internacionais adotados e no caso dos efluentes seguem como referência os valores adotados pelos EUA (NRC, 2010b) mencionados anteriormente. O limite de 7,4 Bq/ml ou GBq/m<sup>3</sup> para o trítio pode ser adotado como limite para monitoração ambiental do HTO. Adotou-se, porém um redutor de 7 vezes que considerou dois fatores de correção para os valores referenciados. Um fator de tempo de exposição (3.5) para integralizá-la durante 1 ano (de 2500 horas-homem para 8760 horas-público) e outro (2) para respeitar o limite de restrição de dose adotado pela instalação (de 0.5 para 0.25 mSv). Assim, o limite adotado de HTO na BIG é de 1,1 GBq/m<sup>3</sup>. Isso implica que ações de intervenção teriam de ser tomadas no caso em que tais valores fossem ultrapassados.



Analisando então as figuras referentes ao período entre o 1º e o 14º dia após o acidente (Figura 4.9 a 4.16), em ambos os cenários, pode-se observar que essas concentrações de referência seriam ultrapassadas, sendo que uma linha sólida demarca a área da BIG que teria valores superiores ao valor limite. Essa mancha atinge, durante o período de maior abrangência entre o 3º e o 7º dia, um raio de cerca de 10 km que se estende desde Itaorna a Ilha Sandri e até a foz do Rio Mambucaba. No cenário 2, a mancha só apareceu até o 7º dia, devido a aceleração da dispersão causada pelo bombeamento da água em Itaorna para o Saco de Piraquara de Fora. Devido à impossibilidade técnica de se tratar um volume tão grande de água e devolve-la abaixo das concentrações em um curto espaço de tempo, o aumento da taxa de bombeamento poderia ser uma medida mitigadora que acelerasse a diluição das concentrações para níveis abaixo do valor de referência. No entanto, em uma situação acidental dessa magnitude, a interrupção das atividades na Baía, principalmente da pesca, é uma medida de intervenção que se impõe, devido às incertezas quanto à dose incorrida pela incorporação do trítio as moléculas orgânicas na cadeia alimentar marinha. Além disso, o retorno das concentrações abaixo do valor de referência não implica necessariamente na liberação imediata das atividades de pesca, mas dependeria essencialmente do acompanhamento do programa de monitoração ambiental, devido às incertezas mencionadas no cálculo da dose.

## **5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

Os resultados obtidos por esse trabalho se baseiam no modelo hidrodinâmico desenvolvido por estudos prévios (Fragoso, 1999; Franklin, 2001) que ainda necessita de uma completa calibração com dados de campo. Além disso, uma vez que não podemos validar o modelo de transporte euleriano através de comparações entre os resultados do modelo calibrado com medidas de campo nos cenários hipotéticos considerados, os resultados obtidos devem ser apreciados com a devida parcimônia. Assim, apesar de

haver confiança no que diz respeito ao comportamento da pluma, os valores de concentração poderiam variar de forma acentuada, devido a incertezas nas condições de contorno e na diluição inicial do termo fonte.

Da mesma forma, o cálculo de dose só tem significado radiológico se associado ao conhecimento experimental das taxas de retenção, conversão e eliminação de trítio organicamente ligado, pelos organismos que efetivamente façam parte da dieta alimentar da população local. Assim, nesse estudo trabalhou-se apenas com concentração de atividades e níveis de referência associados a limites de doses adotados na literatura internacional. Além disso, os resultados se referem a um exercício de interesse puramente acadêmico.

Assim, a partir dos resultados obtidos pela modelagem ambiental da dispersão acidental de trítio, proveniente de um reator de água pesada, o presente estudo concluiu que:

- O modelo hidrodinâmico do SisBaHiA reproduziu corretamente as marés de enchente e vazante, nos período de quadratura e sizígia, além do regime local de ventos.
- Os principais mecanismos responsáveis pela dispersão de trítio na BIG foram a advecção hidrodinâmica da BIG, que o transporta em conjunto com o movimento das massas d'água e a difusão turbulenta do trítio devido aos vórtices gerados por tensões de atritos internos na massa d'água, tensões de atrito com o fundo e atrito de vento na superfície livre.
- A influência da captação e descarga de 120 m<sup>3</sup>/s de água se expressa de forma bastante nítida sobre a hidrodinâmica do estuário. Quando não há essa influência, tanto a Enseada de Itaorna como o Saco de Piraquara de Fora tem velocidades residuais muito reduzidas com resultante sudoeste próximo a praia e recebendo contribuições do Rio Mambucaba originadas a oeste. Considerando a Baía de Ilha Grande como um todo, nesse

cenário é possível observar que o campo de velocidades na fronteira aberta 1 se move em efluxo para porção Oeste em condições de quadratura. Enquanto que em maré de sizígia, junto a fronteira aberta 1, ocorre um deslocamento das correntes em direção a Leste, que ao se aproximarem da Ilha Grande mudam sua direção para o interior da Baía e ao interagirem com as correntes vindas do canal de ligação com a Baía de Sepetiba, formam uma grande área de recirculação na porção centro-sul do estuário.

- O cenário com captação e descarga muda completamente as correntes residuais na área de impacto, com a formação de um cinturão no campo de velocidades formado na saída do Rio Mambucaba que rodeia toda a Ilha Sandri e segue formando um vórtice desde a Praia Vermelha, passando pela Praia Brava até Itaorna, com uma cauda que se estende desde a extremidade dos contrafortes de Itaorna até a área da CNAAA. Além disso, o Saco de Piraquara de Fora que recebe a descarga de  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  forma um vórtice acentuado junto à linha de costa. No entanto as velocidades deste cinturão não são muito altas, oscilando em geral entre 5 e 20 mm/s e em algumas situações mais localizadas, alcançando valores entre 40 a 60 mm/s.
- Foi verificado que há influência determinante da velocidade das correntes de maré no transporte de substâncias conservativas no estuário investigado. Na Baía de Ilha Grande o período de meia-maré (enchente ou vazante) correspondeu ao momento de maior velocidade das correntes, que produziu maior diluição e homogeneização da pluma. Tal fenômeno parece ser recorrente em sistemas estuarinos com onda de maré de caráter estacionário.
- A dispersão de trítio nos dois cenários considerados foi bastante similar na Baía como um todo. As diferenças se fizeram sentir

entre o 3º e o 14º dia, período em que a pluma com concentrações mais elevadas de trítio alcançou distribuição máxima superior a 10 km de diâmetro. No cenário 2, com operação de bombeamento e descarga, a área ocupada por tais concentrações diminuiu mais rapidamente. Observou-se que isso se deu a partir do momento em que as concentrações máximas alcançadas no 3º dia experimentaram a diluição observada nos dias 7 e 14, a qual foi mais rápida no cenário 2 que no cenário 1

- Tal diferença entre os cenários refletiu uma maior diluição da pluma devido à retirada de grande volume de água contaminada na área do acidente e liberação subsequente no Saco de Piraquara de Fora. Assim, um eventual aumento do bombeamento dessas águas poderia ser utilizado no processo de intervenção para acelerar a diluição da pluma. No entanto, essa operação só é efetiva no controle das concentrações mais elevadas, não tendo mostrado nenhuma diferença significativa na distribuição geral da pluma de trítio na BIG.
- A partir do trigésimo dia após o acidente, ocorre uma diminuição acentuada do número e aumento do espaçamento entre as isolinhas que define um padrão de pluma diferente dos anteriores, com tendência a uma ampla homogeneização do sistema. A distribuição das concentrações mostra comportamento assimétrico, onde os mais valores são também os mais freqüentes no domínio.
- Após noventa dias a BIG já se apresenta, com exceção da Baía da Ribeira, com valor de concentração de atividade abaixo da atividade mínima detectável. Após seis meses do acidente, a pluma já estaria diluída entre 5 e 10 milhões de vezes, o que representa níveis de concentração iguais ou inferiores aos do efluente liberado de forma rotineira e finalmente, após um ano do

acidente, a BIG teria retornado a condição original com respeito ao trítio.

- Uma vez que a liberação se dá em bateladas, que são operações comuns no gerenciamento de efluentes em centrais nucleares tanto em situação de rotina como acidental, a melhor solução analítica para a distribuição da concentração é a de fonte pontual instantânea gerada em um tempo  $t=0$  e localizada na fronteira de terra em um sistema de coordenadas cartesiano (malha de discretização) em um fluido de extensão infinita. Assim, a liberação contínua, adotada como solução em um estudo prévio sobre a liberação rotineira da CNAAA, não é adequada e a condição de regime estacionário obtida foi possivelmente induzida pela falsa premissa de continuidade da fonte no tempo.
- Uma medida de mitigação do acidente, além do aumento da taxa de bombeamento da Enseada de Itaorna para o Saco de Piraquara de Fora durante a primeira semana após o acidente, seria a interdição das atividades pesqueiras na BIG. Tal interdição deveria ser acompanhada da monitoração contínua de HTO na água do mar e de HTO e OBT em organismos bioindicadores. Devido à falta de estudos sobre contaminação com trítio em espécies tropicais não existem níveis seguros pré-definidos e, assim, teriam de ser adotados valores de estudos com espécies de países temperados como limite para liberação da pesca.
- Recomenda-se que seja estudada a aplicabilidade dos modelos de assimilação e depuração de OBT desenvolvidos em países de clima temperado e a necessidade de adaptação dos mesmos aos sistemas aquáticos tropicais a partir de simulações do transporte de trítio em cenários de acidentes hipotéticos e comparação de resultados. Para tanto trabalhos experimentais com espécies representativas da dieta alimentar das comunidades locais teriam de ser conduzidos. Tais estudos poderiam igualmente permitir

estimar os fatores de transferência entre o meio líquido e os organismos aquáticos, que são uma grande lacuna nos estudos de radioecologia tropical.

- Recomenda-se simular a dispersão de mais radionuclídeos (e.g.  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{55}\text{Fe}$  e  $^{54}\text{Mn}$ ) presentes nos efluentes da CNAAA com comportamento não conservativo e o decaimento radioativo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AECL. **CANDU 6 – Technical Summary**. 2005.

AJIT MUZUMDAR AND DANIEL MENELEY. **Large LOCA Margins & Void Reactivity in CANDU Reactors**. COG -07-9012, Issued August 2007.

AJIT MUZUMDAR AND DANIEL MENELEY. **Large LOCA Margins in CANDU Reactors - an Overview of the COG Report**. COG -07-9012, Issued August 2009.

ALDAMA, A. **Theory and applications of two- and three-scale filtering approaches for turbulent flow simulation**. Ph.D. Thesis, Dept. Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1985.

BEDFORD, K. **Diffusion, dispersion and sub-grid parameterization**. Chapter 4 in “Coastal, Estuarial and Harbour Engineers” Reference Book”, Ed. by M. B. Abbot and W. A. Price, E&FN Spon, 1994.

BELO, W. C. **O Fundo Marinho da Baía da Ilha Grande, RJ: Evidências da Ação de Correntes e de Ondas no Canal Central com Base em Formas de Fundo Observadas em Registros de Sonar (100kHz)**. Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 20 (1), p. 17-30, 2002.

BELO, W. C. **O Fundo Marinho da Baía da Ilha Grande, RJ: O Relevo Submarino e a Sedimentação no Canal Central.** Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 20 (1), p. 05-15, 2002.

CHIH-AN HUH, *et al.* **Marine environmental Radioactivity Near Nuclear Power Plants in Northern Taiwan.** Journal of Marine Science and Technology, Vol. 12, No. 5, pp. 418-423, 2004.

EPA, Environmental Protection Agency. **“40 CFR 190 Environmental Radiation Protection Requirements for Normal Operations of Activities in the Uranium Fuel Cycle: Final Environmental Statement, Volumes 1&2”.** November 1, 1976.

FAIRLIE, I. **Tritium Hazard Report: Pollution and Radiation Risk from Canadian Nuclear Facilities.** Greenpeace, 2007.

FERREIRA DA SILVA, L. C. *et al.* **Litoral Sul Fluminense: Síntese do Conhecimento das Condições Climatológicas e da Dinâmica Costeira.** Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Relatório Técnico para Furnas Centrais Elétricas. 1996.

FISCHER, H.B.; List, E.J.; Koh, R.C.Y.; Imberger, J. & Brooks, N.H. **Mixing in Inland and Coastal Waters.** Academic Press, Inc., New York, 1979.

FRAGOSO, M. R. **Estudo numérico da circulação marinha da região das Baías de Sepetiba e Ilha Grande (RJ).** Dissertação (Mestrado)- Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

FRANKLIN, M. R. **Estudo da circulação hidrodinâmica e do transporte de radionuclídeos na Baía da Ilha Grande – RJ.** Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2001.

FSAR, Final Safety Analysis Report. **Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto – Unidade 2.** Rev. 28 . Eletronuclear - Eletrobras Termonuclear S.A., 1999.

HALERMAN, D. R. F. **Water Quality Control**. Massachusetts Institute of Technology - MIT. 1987

IAEA, International Atomic Energy Agency. **Inventory of radioactive waste disposals at sea**. IAEA-Technical Document Series - TECDOC – 1105, Vienna, 121p, 1999.

IKEDA. et al., **Determination of circulation and short period fluctuation in Grande Bay (RJ), Brazil**. Bolm Inst. Oceanography, São Paulo, Vol. 29(1), p. 89-98, 1980.

IKEDA. et al., **Seasonal characteristics of hydrograph, turbulence and dispersion near Ilha Grande (RJ), Brazil, based on R/V “Prof. W. Besnard” data**. Bolm Inst. Oceanography, São Paulo, Vol. 31(1), p. 11-32, 1982.

IKEDA. et al., **Um estudo de series temporais de corrente na Baía de Ilha Grande, RJ**. Relatório do Instituto Oceanográfico. Universidade de São Paulo, São Paulo, Vol. 28, p. 01-24, 1989.

MAHIQUES, M. M. **Considerações sobre os sedimentos de Superfície e de fundo da Baía da Ilha Grande, Estado do Rio de Janeiro**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, 1987.

MARTIN, J. L. AND McCUTCHEON, S.C. **Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling**. CRC Press – Lewis Publishers. 1999

MATSUURA, Y. **Contribuição ao estudo da estrutura oceanográfica da região sudeste entre Cabo Frio (RJ) e Cabo de Santa Marta (SC)**. *Ciência e cultura*, 38(8), pp. 1439-1450. São Paulo, 1986.

MIRANDA, L. B.; Ikeda, Y.; Castro Filho, B.M. and Pereira Filho, N. **Note on the occurrence of saline fronts in Ilha Grande Region (RJ)**. Bol. Inst. Oceanográfico da USP, (26), pp. 249-256, 1977.

NICOLLI, D. **Análise da rosa dos ventos em Itaorna**. Relatório, DIN –01/82, 1982.



NRC, National Regulatory Commission. 10 CFR Part Appendix A to Part 50--**General Design Criteria for Nuclear Power Plants**. 2010a. <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part050/part050-appa.html>

NRC, National Regulatory Commission. 10 CFR Part 20. **Standards for Protection Against Radiation**. 2010b. <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part020/full-text.html>

NRC, National Regulatory Commission. **Backgrounder on Tritium, Radiation Protection Limits, and Drinking Water Standards**. 2010c. <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/tritium-radiation-fs.html>

ROSMAN, P. C. C. **Referência Técnica do SisBaHiA**. 2009.

ROSMAN, P.C.C. **Subsídios para modelagem de sistemas estuarinos**. Capítulo 3 do livro Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 3, PP 231-343, ABRH, 1997.

ROSMAN, P.C.C. **Modelos de Circulação em Corpos d'Agua Rasos**. Capítulo 3 do livro Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 1. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1989.

ROSMAN, P.C.C. **Modeling Shallow Water Bodies via Filtering Techniques**. Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1987.

R HELING. **Modification of LAKECO-B for H-3**. Nuclear Research and Consultancy Group, 2002.

SIGNORINI, S. R. **A study of circulation in Bay of Ilha Grande and Bay of Sepetiba**. Bolm. Instituto Oceanográfico, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 41- 55, 1980.

TAUHATA, L. *et al.* **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. Instituto de Radioproteção e Dosimetria – CNEN, 2003.