

ANDRÉ SILVA DE AGUIAR

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE ACIDENTE COM LIBERAÇÃO DO
REFRIGERANTE DE REATOR PWR. ESTUDO DE CASO: ANGRA 3**

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

2011

Aguiar, André Silva de

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE ACIDENTE COM
LIBERAÇÃO DO REFRIGERANTE DE REATOR PWR.
ESTUDO DE CASO: ANGRA 3.** André Silva de Aguiar – Rio
de Janeiro: IEN/CNEN, 2011.

119p.il.

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

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reatores) –
Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2011.

1. Reator PWR 2. Modelagem ambiental. 3. Liberações
Acidentais. 4. Radionuclídeos 5. SisBaHiA.

CDD

CDU

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE ACIDENTE COM LIBERAÇÃO DO REFRIGERANTE
DE REATOR PWR. ESTUDO DE CASO: ANGRA 3

André Silva de Aguiar

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.

Aprovada por:

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

Prof. Francisco Fernando Lamego Simões Filho, D. Sc.
(Orientador)

Profa. Maria de Lourdes Moreira, D. Sc.
(IEN/CNEN)

Prof. Antonio Carlos Marques Alvim, Ph.D.
(COPPE/UFRJ)

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
FEVEREIRO DE 2011

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS, sempre presente em minha vida

Agradeço a minha Mãe e minha irmã por todo o carinho, apoio e amor presentes em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis. A minha querida e amada noiva Ana Paula por todo amor e compreensão, e também ao meu cunhado Rodrigo, pela paciência, por ter me escutado falar sobre todo o trabalho.

Agradeço aos Professores Francisco Fernando Lamego Simões Filho e Celso Marcelo Franklin Lapa, pela dedicada orientação, suporte e principalmente pela confiança depositada, o que me motivou a superar todas as dificuldades.

Aos amigos do Mestrado, que com o companheirismo deram mais alegria aos dias de estudo e trabalho, em especial ao meu grande amigo Abner Duarte, pelas longas noites que ficávamos acordados, trocando informações e discutindo sobre as diversas questões teóricas e a todos os professores do Programa de Pós-graduação do Instituto de Engenharia Nuclear, por todos os ensinamentos e pela enorme dedicação.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho e à direção do IEN.

E a todos que de alguma forma contribuíram indiretamente para este trabalho.

“O cientista modifica o meio. A verdadeira ciência modifica o cientista!”

Autor desconhecido

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

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE ACIDENTE COM LIBERAÇÃO DO
REFRIGERANTE DE REATOR PWR. ESTUDO DE CASO: ANGRA 3

André Silva de Aguiar

Fevereiro de 2011

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 postulada de radionuclídeos a partir de reator de potência, através da modelagem ambiental no meio aquático. Para isso foram usados modelos computacionais hidrodinâmico e de transporte para a simulação da dispersão de radionuclídeos causada por um acidente em uma central nuclear do tipo PWR. Este exercício foi realizado com auxílio de um sistema acadêmico de códigos desenvolvido pela COPPE/UFRJ, chamado SisBaHiA.

A usina de Angra 3 é um reator que usa a água leve pressurizada como moderador e refrigerante do núcleo. Postulou-se então, um acidente do tipo LOCA (Loss of coolant accident), precisamente um LBLOCA, no sistema de resfriamento do núcleo (sem fusão), durante o qual foram quase instantaneamente perdidos 431 m³ de refrigerante. Tal inventário continha 1,87x10¹⁰ Bq/m³ de trício, 2,22x10⁷ Bq/m³ de cobalto e 3,48x10⁸ Bq/m³ de césio, usina a 100% de operação, e foi lançado próximo a praia de Itaorna, Angra dos Reis – RJ.

Aplicando o modelo no cenário proposto (usina Angra 1 e 2 em funcionamento e Angra 3 com variação da captação e descarga tendo a descarga progressivamente reduzida após o acidente), a diluição da atividade específica da mancha dos radionuclídeos simulados, alcançou valores inferiores após 22 horas, aos níveis de referência para água do mar (1,1x10⁶ Bq/m³, 1,11x10⁴ Bq/m³ e 1,85x10³ Bq/m³), respectivamente para o ³H, ⁶⁰Co e ¹³⁷Cs. Após 54 horas de simulação os níveis dos radionuclídeos, na área de influência indireta, já estão abaixo dos valores mínimos de atividade detectados pelo laboratório de monitoração ambiental da CNAEA (5,2x10⁴ Bq/m³, 3,0x10² Bq/m³ e 2,5x10² Bq/m³), respectivamente para o ³H, ⁶⁰Co e ¹³⁷Cs.

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

IMPACT ASSESSMENT OF COOLANT ACCIDENTAL RELEASE FROM A
PWR REACTOR. STUDY CASE: ANGRA 3

André Silva de Aguiar

February/2011

Advisors: Celso Marcelo Franklin Lapa, D. Sc.

Francisco Fernando Lamego Simões Filho, D. Sc.

Program: Nuclear Engineering

Abstract:

This study aimed to evaluate the impact of a postulated accidental release of radionuclides from a nuclear power reactor into the aquatic resources, using an environmental modeling. To achieve that, computational models of hydrodynamics and transport were used to simulate the radionuclides dispersion caused by an accident in a PWR. This exercise was accomplished with the aid of a code system (SisBAHIA) developed at Rio de Janeiro Federal University (COPPE/UFRJ).

The nuclear power plant Angra 3 is a reactor that uses pressurized light water as moderator and coolant in the core. It was postulated, then, the LOCA (Loss of coolant accident), precisely a LBLOCA, in the cooling system of the core (without fusion), where 431 m³ of soda almost instantaneously were lost. This inventory contained 1,87x10¹⁰ Bq/m³ of tritium, 2,22x10⁷ Bq/m³ of cobalt and 3,48x10⁸ Bq/m³ of cesium, power plant working at 100%, and it was released in liquid form into the Itaorna cove, Angra dos Reis – RJ.

Applying the model to the proposed scenario (Angra 1 and 2 in operation and Angra 3 progressively reducing the capture and discharge after the accident), the simulated dilution of the specific activity of radionuclide spots reached values much lower than reference levels for seawater (1,1x10⁶ Bq/m³, 1,11x10⁴ Bq/m³ and 1,85x10³ Bq/m³) after 22 hours, respectively for ³H, ⁶⁰Co and ¹³⁷Cs. After 54 hours of simulation, the levels of radionuclides, in the area of indirect influence, are below of the minimum levels of activity detected by the environmental monitoring laboratory of CNAEA (5,2x10⁴ Bq/m³, 3,0x10² Bq/m³ and 2,5x10² Bq/m³), respectively for ³H, ⁶⁰Co and ¹³⁷Cs.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura</i>	<i>Página</i>
Figura 1 – Corte longitudinal do reator	37
Figura 2 – Perspectiva isométrica do sistema de refrigeração do reator	40
Figura 3 – Localização da CNAAA mostrando as captações e descargas previstas com a entrada em operação do futuro sítio de Angra 3	41
Figura 4 – Conexões dos trens dos sistemas de resfriamento de emergência do núcleo no sistema de refrigeração do reator	42
Figura 5 – Baía da Ilha Grande.	48
Figura 6 – Vazão média mensal do rio Mambucaba	51
Figura 7 – Constantes harmônicas utilizadas	53
Figura 8 – Batimetria utilizada na modelagem	56
Figura 9 – Dados de entrada dos ventos usuais	59
Figura 10 – Domínio simulado	62
Figura 11 – Condições iniciais	64
Figura 12 – Domínio da BIG discretizado	65
Figura 13 – Distribuição de amplitude da rugosidade	67
Figura 14 – Local da ruptura no sistema primário – LBLOCA	71
Figura 15 – Curva de maré utilizada na simulação do cenário proposto, gerada com as constantes harmônicas determinadas com base nas medidas obtidas na estação maregráfica	75
Figura 16 – Campo de velocidades para o instante de 22 horas de simulação. Período de meia maré enchente em situação de sizígia	76
Figura 17 – Campo de velocidades para o instante de 30 horas de simulação. Período de meia maré vazante em situação de sizígia	77
Figura 18 – Campo de velocidades para o instante de 79 horas de simulação. Período de meia maré vazante em situação de sizígia.	78

Figura 19 – Campo de velocidades para o instante de 170 horas de simulação. Período de meia maré enchente em situação de sizígia	79
Figura 20 – Campo de velocidades para o instante de 280 horas de simulação. Período de meia maré enchente em situação de quadratura	80
Figura 21 – Campo de velocidades para o instante de 289 horas de simulação. Período de meia maré vazante em situação de quadratura	81
Figura 22 – Campo de velocidades para o instante de 333 horas de simulação. Período de meia maré enchente em situação de quadratura.	82
Figura 23 – Campo de velocidades para o instante de 340 horas de simulação. Período de meia maré vazante em situação de quadratura	83
Figura 24 – Ponto de lançamento do efluente mostrado pela malha de discretização com o nó central 8282 e os nós laterais 8279 e 8419	86
Figura 25 – Dispersão da pluma de trício 22 horas após o acidente	89
Figura 26 – Dispersão da pluma de trício 30 horas após o acidente	90
Figura 27 – Dispersão da pluma de trício 79 horas após o acidente	90
Figura 28 – Dispersão da pluma de trício 170 horas após o acidente	91
Figura 29 – Dispersão da pluma de trício 333 horas após o acidente	91
Figura 30 – Dispersão da pluma de cobalto 22 horas após o acidente	93
Figura 31 – Dispersão da pluma de cobalto 30 horas após o acidente	94
Figura 32 – Dispersão da pluma de cobalto 54 horas após o acidente	94
Figura 33 – Dispersão da pluma de cobalto 79 horas após o acidente	95
Figura 34– Dispersão da pluma de cobalto 103 horas após o acidente	95
Figura 35 – Dispersão da pluma de césio 22 horas após o acidente	97
Figura 36 – Dispersão da pluma de césio 30 horas após o acidente	98
Figura 37 – Dispersão da pluma de césio 54 horas após o acidente	98
Figura 38 – Dispersão da pluma de césio 79 horas após o acidente	99
Figura 39 – Dispersão da pluma de césio 170 horas após o acidente	99

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela</i>	<i>Página</i>
Tabela 1. Concentração dos radionuclídeos (Bq / m ³), utilizados na simulação, com purificação de 0,1 h	44
Tabela 2. Frequências de eventos iniciadores de LOCA, de falhas no Sistema de Segurança e de fusão do núcleo do reator	47
Tabela 3. Rios mais expressivos da área de influência direta	49
Tabela 4. Amplitudes da rugosidade equivalente de fundo	66
Tabela 5. Sequência de eventos para o LBLOCA na perna-quente	72
Tabela 6. Valores adotados na confecção das figuras de distribuição da concentração de atividade do trítio, cobalto e cézio, com os índices de diluição associados	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BIG: Baía de Ilha Grande

CNEN: Comissão Nacional de Energia Nuclear

PWR: Pressurized Water Reactor

MW_e : Mega Watts Elétricos

MWt: Mega Watts Térmicos

³H: Trítio ou Trício

⁶⁰Co: Cobalto

¹³⁷Cs: Césio

Bq: Bequerel

DHN: Diretoria de Hidrografia e Navegação

CNAAA: Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto

LOCA: Loss of Coolant Accident

LBLOCA: Large – Break Loss of Coolant Accident

SUMÁRIO

	<i>Página</i>
1. INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	17
1.2 RELEVÂNCIA DO ESTUDO REALIZADO	18
1.3 ESTUDOS ANTERIORES	21
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	22
2. MODELOS COMPUTACIONAIS DE QUALIDADE D'ÁGUA	24
2.1 SIMCAT	26
2.2 PC – QUASAR	27
2.3 MIKE 11	29
2.4 QUAL2E	30
2.5 WASP	31
2.6 SISBAHIA	32
3. ANGRA III – VISÃO GERAL	36
3.1 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DO REATOR	38
3.2 SISTEMAS DE RESFRIAMENTO DE EMERGÊNCIA	42
3.3 ORIGEM DOS ELEMENTOS RADIOATIVOS	43
3.4 ACIDENTES COM PERDA DE REFRIGERANTE – LOCA	45
4. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA BAÍA DA ILHA GRANDE	48
4.1 LOCALIZAÇÃO	48
4.2 HIDROGRAFIA	49
4.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO RIO MAMBUCABA	50
4.2.2 ONDAS	51
4.2.3 MARÉS	52
4.2.4 CIRCULAÇÃO	54
4.3 BATIMETRIA	55

4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS SEDIMENTOS DE FUNDO	57
4.5 VENTO	58
5. METODOLOGIA	60
5.1 DOMÍNIO SIMULADO	60
5.1.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO DE TERRA	60
5.1.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO ABERTO	61
5.1.3 CONDIÇÃO INICIAL	63
5.1.4 GEOMETRIA DO DOMÍNIO SIMULADO	64
5.1.5 RUGOSIDADE DO FUNDO	65
5.2 RADIONUCLÍDEOS SELECIONADOS PARA SIMULAÇÃO	67
5.2.1 TRÍCIO (^3H)	68
5.2.2 CÉSIO (^{137}Cs)	69
5.2.3 COBALTO (^{60}Co)	69
5.3 LOCA NO SISTEMA PRIMÁRIO POR GRANDE RUPTURA NA PERNA QUENTE	70
6. RESULTADOS	74
6.1 CENÁRIO SIMULADO	74
6.2 SIMULAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO	74
6.3 MODELO DE TRANSPORTE EULERIANO 2DH	84
6.3.1 IMPLEMENTAÇÃO DO CENÁRIO DE TRANSPORTE	86
6.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	88
6.4.1 TRÍCIO	88
6.4.2 COBALTO	92
6.4.3 CÉSIO	96
6.5 AVALIAÇÃO DO IMPACTO	100
7. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	104
APÊNDICE A – SIMCAT – SIMulation of the water quality of CATchments	107
APÊNDICE B – PC – QUASAR – Quality Simulation Along Rivers	108

APÊNDICE C – MIKE 11	109
APÊNDICE D – QUAL2E	111
APÊNDICE E – WASP– Water Quality Analysis Simulation Program	112
APÊNDICE F – SISBAHIA – Sistema base de Hidrodinâmica Ambiental	113
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

1. INTRODUÇÃO

À medida que cresce a população da Terra, cresce também a demanda por energia e pelos benefícios que esta proporciona. Com a preocupação mundial em relação ao aquecimento global, torna-se necessária a utilização de fontes limpas, ou seja, não causadoras do efeito estufa. Este é o caso da geração termonuclear de energia, que além de gerar poucos resíduos em condições normais de operação, ocupa área de reduzidas dimensões se comparada à quantidade de energia gerada.

No Brasil, a procura da tecnologia nuclear começou na década de 50, com o pioneiro nesta área, Almirante Álvaro Alberto, mas a decisão quanto à implantação de usinas nucleares aconteceu de fato em 1969. Desde então foram construídas duas unidades no município de Angra dos Reis, com previsão de uma terceira unidade entrar em operação no ano de 2015. A localização da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) em Angra dos Reis, na costa verde fluminense, sempre foi motivo de preocupação da opinião pública devido à rica biodiversidade de espécies marinhas presentes em toda a extensão da Baía da Ilha Grande. Um amplo programa de monitoramento ambiental foi desenvolvido e é mantido pelo operador, desde antes do início das operações. Entretanto, há também a necessidade de se prognosticar o comportamento dos efluentes liberados e desta forma prever a dose de radiação a que a população local está exposta, tanto em operação normal como em condição de acidente, comparando-se com os limites definidos no licenciamento.

Uma das formas mais usadas atualmente para prever essas situações é a simulação computacional com uso de modelos matemáticos que permitem quantificar o fluxo dos corpos de água (hidrodinâmica ambiental) e o transporte de poluentes (e.g. radionuclídeos, metais pesados, hidrocarbonetos, organoclorados, etc.), a partir dos seus respectivos termos fonte, em mananciais naturais como rios, lagos, estuários e áreas costeiras. Por sua grande capacidade de realizar cálculos, o computador passou a ser utilizado

em centros de pesquisas do mundo todo e com aplicações diversas. Nesse contexto, surgiram inúmeros programas e pacotes de modelagem ambiental que podem ser utilizados para simular o transporte de tais substâncias ou as reações geoquímicas que as mesmas sofrem no meio aquático. Alguns modelos acoplam equações matemáticas pertinentes aos dois tipos de processo, permitindo avaliar o transporte reativo, no caso de substâncias ditas não conservativas, ou seja, que tendem a se degradar com o tempo, diminuindo sua concentração em solução.

Existem três tipos básicos de modelos para estimativa da concentração de radionuclídeos em águas superficiais: modelos analíticos, modelos de compartimento (“Box-model”) e modelos numéricos (IAEA, 2002). Modelos analíticos resolvem as equações básicas de transporte (advecção e difusão) com significativas simplificações de modo a atingir soluções exatas para as equações governantes. Tais simplificações normalmente incluem a geometria do corpo de água, condições de fluxo e processo de dispersão que são constantes ao longo de todo o sistema e intervalo de tempo simulado. São fáceis e rápidos, porém possuem como limitantes uma pequena faixa de aplicação e menor exatidão potencial entre os modelos (IAEA, 2002).

Os modelos de compartimento procuram segmentar o corpo de água em compartimentos homogêneos interconectados para representar o mesmo. São usados extensivamente para problemas de qualidade da água e eutrofização da água, porém apresentam como limitações a supersimplificação quanto à homogeneidade e transferência de massa entre os diversos compartimentos, o que implica em grandes incertezas na simulação do transporte de poluentes (Onishi, 2008).

Os modelos numéricos são as mais avançadas formas de simulação computacional disponíveis hoje. Eles transformam as equações governantes de uma, duas ou três dimensões, em formas de elementos finitos, diferenças finitas ou volumes finitos para permitir a variação da geometria do domínio de modelagem, condições de fluxo, transporte de sedimentos e dispersão, assim como os processos químicos e biológicos reativos citados acima (IAEA, 2001).

Muitas vezes modelos numéricos são utilizados em conjunto com modelos analíticos para simulação 3D hidrodinâmica. Desta forma, possuem maior aplicabilidade que os outros dois tipos e são indispensáveis em situações onde seja necessário: i) Prever situações simulando cenários para estudos e projetos de engenharia, ii) Mapeamento de áreas de risco e determinação no licenciamento de destinos prováveis de contaminantes, etc, iii) Prever situações para planos de contingência e mitigação, e definição de estratégias de ação em caso de acidentes, iv) Prever evolução de eventos em tempo real, o que é fundamental para planejamento de ações emergenciais.

De um modo geral, acidentes em usinas nucleares com a liberação dos radionuclídeos de reatores PWR, com ou sem rompimento da contenção, para o meio ambiente envolvem primariamente a via atmosférica, cuja simulação já foi realizada em um estudo anterior (Gonçalves Junior, 2006). Poucos estudos tem se preocupado em simular uma liberação acidental do inventário do reator na forma líquida, especialmente do refrigerante, nos corpos de água que já recebem a descarga contínua de águas do sistema terciário de refrigeração. Essa baixa preocupação se deve a alta capacidade de depuração proporcionada pelo meio hídrico, especialmente no caso da CNAAA, e que torna as atenções naturalmente mais voltadas para as liberações atmosféricas. No entanto, nenhuma simulação com modelos numéricos de cenários de acidente envolvendo liberação de refrigerante na Baía da Ilha Grande, foi realizada até o momento.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral, contribuir para a avaliação do impacto radiológico ambiental, através da determinação, por modelagem numérica, do destino dos radionuclídeos liberados pela Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) – UNIDADE 3, devido a um LOCA (**L**oss of **C**oolant **A**ccident) no sistema primário.

Os objetivos específicos do trabalho são:

1. Estabelecer um cenário compatível de liberação acidental de refrigerante e caracterizar o inventário liberado a partir do futuro sítio do reator PWR de Angra 3, considerando a redução paulatina da captação e descarga da referida usina no modelo de circulação hidrodinâmica 3D calibrado por estudos previamente realizados.
2. Avaliar a dispersão dos radionuclídeos liberados nas águas da Baía da Ilha Grande utilizando o modelo euleriano de simulação de transporte 2DH advectivo-difusivo com reações cinéticas.
3. Avaliar o impacto ambiental causado pelo acidente postulado e as possíveis ações de intervenção e medidas mitigadoras que poderiam ser tomadas em caso de liberação acidental nas águas da Baía da Ilha Grande, buscando quantificar o risco associado, se houver.

1.2 RELEVÂNCIA DO ESTUDO REALIZADO

Na natureza existe uma quantidade de radiação, denominada radiação natural de fundo. Nas rochas comuns, por exemplo, granito, encontramos vários elementos radioativos naturais das séries de decaimento do urânio e do tório, que decaem continuamente. Dentre eles, destacamos o rádio que produz o gás radioativo radônio, que participa da composição do ar que respiramos.

A radiação origina-se nos átomos, unidades básicas de constituição de todas as formas de matéria. A maior parte dos átomos é estável, mas alguns elementos possuem átomos instáveis, ou seja, radioativos, que detêm um excesso de energia interna no núcleo e que emitem essa energia num processo de decaimento até atingir uma situação de estabilidade.

Essa energia é emitida sob a forma de ondas – raios gama – que são ionizantes e de partículas com alta velocidade – partículas alfa e beta, que

também são ionizantes por terem a capacidade de produzir partículas eletricamente ativas, chamadas íons, nos materiais expostos. A radiação ionizante tem a capacidade de afetar as moléculas que constituem todos os seres vivos e provocar alterações biológicas complexas. (Natrontec, 1998).

Os nêutrons, unidades sem carga elétrica constituintes do núcleo dos átomos, também podem existir como radiação ionizante, ou seja, indiretamente ionizante. Fazem parte da chamada radiação cósmica, ocorrem em função de colisões de átomos na atmosfera terrestre e, como de maior interesse para a geração nucleoeleétrica, ocorrem a partir das reações controladas de fissão nuclear de certos tipos de átomos no interior de um reator.

Os raios cósmicos ultra-energéticos, partículas mais energéticas conhecidas pela ciência, têm origem nos buracos negros supermassivos. Já os de baixa energia são oriundos do Sol. Esses raios cósmicos são constituídos por prótons, elétrons, nêutrons, mésons, neutrinos e núcleos leves. 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. (Natrontec, 1998).

A atmosfera funciona como uma blindagem, atenuando e absorvendo bastante os raios cósmicos e radiações secundárias. A população da cidade de Petrópolis, por exemplo, recebe maiores doses de radiação cósmica do que àquela ao nível do mar, porque a sua intensidade aumenta com a altura em relação ao oceano, isto é, depende da espessura da camada de ar. Quanto maior for o valor da sua espessura, maior será a fração absorvida de radiação e, conseqüentemente, menor será a dose recebida pela população.

Um dos resultados do bombardeio constante da atmosfera superior pelos raios cósmicos, principalmente nêutrons, é a produção dos denominados radionuclídeos cosmogênicos: ^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{22}Na e ^{85}Kr . Como quase todos os organismos vivos têm grande quantidade de carbono e hidrogênio, 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. podem participar 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.

O incremento de radionuclídeos no meio ambiente está intimamente ligado à ação humana. Em 1945, os EUA começaram a testar artefatos nucleares. A partir de 1946 começaram testes no 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 trício 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, a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA – sigla em inglês) indica que a ocorrência de materiais radioativos naturais nos oceanos continua sendo a contribuição mais significativa para a dose de radiação no homem.

Segundo a Agência Internacional de Energia Atômica (1999), há 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;

No Brasil existem duas usinas nucleares conhecidas como a CNAEA – Unidade 1 e 2, estas em funcionamento e atualmente uma nova unidade nuclear está em construção, a Unidade 3. Essas duas unidades geram parte da eletricidade para o Estado do Rio de Janeiro e têm capacidade para gerar 657 MW_e (Angra 1), 1300 MW_e (Angra 2) e posteriormente 1300 MW_e (Angra 3).

Os dois reatores em funcionamento são do tipo PWR (*Pressurized Water Reactor* – em inglês), ou seja, água pressurizada, e a nova unidade em construção terá o mesmo reator acima mencionado, sendo que as duas usinas, Angra 2 e Angra 3 possuem a mesma tecnologia, de origem alemã.

Há liberações de efluentes líquidos para o meio ambiente (mar) que são rotineiras e visam liberar a água do sistema primário do reator, pois a mesma deve ser trocada periodicamente. Essa água fica estocada e recebe tratamento, sendo liberada somente quando está abaixo do limite estipulado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear-CNEN.

A liberação de efluentes líquidos relativos às unidades nucleares acontece na Baía da Ribeira, umas das baías contidas na Baía da Ilha Grande. A respeito dos efluentes radioativos, a CNEN é a responsável por fiscalizar se esses rejeitos estão sendo liberados dentro das normas.

Assim, para se conhecer melhor o transporte dos rejeitos radioativos, em especial do trítio (^3H), céscio (^{137}Cs) e cobalto (^{60}Co), no ambiente marinho, é necessária a caracterização da circulação hidrodinâmica na Baía da Ilha Grande.

1.3 ESTUDOS ANTERIORES

No trabalho de dissertação de Franklin (2001), foi feita uma simulação utilizando o sistema computacional SisBAHIA, a fim de analisar a dispersão de trítio (^3H) e de céscio (^{137}Cs) liberados rotineiramente para o meio ambiente pela CNAAA, unidades 1 e 2 e desta forma contribuir para o aperfeiçoamento da avaliação do impacto radiológico ambiental.

Após análise de diversos cenários, os resultados obtidos pelo modelo indicavam que, no que tange a situação de rotina, nenhum impacto radiológico significativo estivesse ocorrendo devido à exposição da população aos radionuclídeos presentes nos efluentes líquidos da CNAAA.

No trabalho de dissertação de Soares (2010), foi inserido, no local onde está sendo construído angra 3, um Candu 6 de terceira geração, cujo objetivo era simular um acidente tipo LOCA e observar a dinâmica da pluma de trício liberada, já que este tipo de reator gera 20 vezes mais trício do que um do tipo PWR.

Foram avaliados dois cenários, sendo que no primeiro com todas as usinas paradas, verificaram-se concentrações mais elevadas de trício, alcançando distribuição máxima superior a 10 km de diâmetro. No cenário 2, com a continuidade das operações de bombeamento e descarga das usinas Angra 1 e 2, a área ocupada por tais concentrações diminuiu mais rapidamente. A partir das concentrações máximas alcançadas no 3º dia, o cenário 2 experimentou maior diluição entre o 7º e 14º dias.

Tal diferença entre os cenários refletiu uma aceleração da diluição da mancha, 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 da taxa de bombeamento, aumentando a circulação das águas entre a praia de Itaorna e a Baía da Ribeira, poderia ser utilizado no processo de intervenção.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A dissertação é composta de 8 capítulos, em que o presente conduz o leitor a uma breve introdução sobre o tema, os objetivos da pesquisa, a relevância do trabalho e os estudos anteriores realizados.

O capítulo 2 trata dos termos da equação de conservação de massa e do modo como alguns modelos computacionais de qualidade d'água são usados na simulação em corpos d'água superficial, sendo que o último modelo apresentado é o utilizado pelo autor. A fim de demonstrar a aplicação dos modelos, foram relacionados alguns trabalhos relativos a cada programa,

sendo que apresentações mais detalhadas sobre cada um deles pode ser encontrada nos trabalhos indicados nos apêndices.

O capítulo 3 mostra uma visão geral da usina Angra 2, pois esta compartilha da mesma tecnologia de Angra 3, por este motivo utilizou-se das informações do FSAR – Final Safety Analysis Report e EIA-RIMA – Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental, de Angra 2 para confecção desta dissertação.

O capítulo 4 apresenta as características físicas do local modelado, onde se mostra sua localização e seu sistema hidrográfico, com a caracterização do seu principal rio, o Mambucaba, bem como o regime de marés, ondas, ventos, circulação e também sua batimetria.

O capítulo 5 apresenta a metodologia utilizada neste trabalho, bem como a ilustração do acidente em Angra 3. No capítulo 6 são apresentados os resultados da simulação referente a cada radionuclídeo, bem como, o impacto desses radionuclídeos no meio ambiente. No capítulo 7 são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros e no capítulo 8 estão elencados todos os trabalhos que serviram de referência para a realização desta dissertação.

2. MODELOS COMPUTACIONAIS DE QUALIDADE D'ÁGUA

O transporte e o destino de radionuclídeos em águas superficiais podem ser expressos na seguinte equação de advecção e difusão em termos de coordenadas cartesianas (Onish, 2008):

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \mu \frac{\partial C}{\partial x} + \nu \frac{\partial C}{\partial y} + (\omega - \omega_s) \frac{\partial C}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \lambda \quad (1) \end{aligned}$$

Onde:

C = concentração do radionuclídeo (Bq/m³)

t = tempo (s)

ω_s = velocidade de remoção do contaminante (m/s)

x, y, z = direções longitudinal, lateral e vertical (m)

μ, ν, ω = componentes da velocidade nas direções x, y e z (m/s)

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ = coeficientes de dispersão nas direções x, y e z (m²/s)

λ = taxa de decaimento do radionuclídeo (s)

Em situações de liberação acidental durante curto intervalo de tempo (i.e. liberação instantânea) a equação 1 tem a seguinte solução analítica, assumindo v , ω e ω_s igual a zero (Sayre 1975 apud Onishi 2008).

$$C(x, y, z, t) = W_R f_x(x, t) f_y(y, t) f_z(z, t) \exp(-\lambda t) \quad (2)$$

$$f_x(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\varepsilon_x t}} \exp\left\{-\frac{(x - \mu t)^2}{4\varepsilon_x t}\right\} \quad (3)$$

$$f_y(y, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\varepsilon_y t}} \exp\left\{-\frac{y^2}{4\varepsilon_y t}\right\} \quad (4)$$

$$f_z(z, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\varepsilon_z t}} \exp\left\{-\frac{z^2}{4\varepsilon_z t}\right\} \quad (5)$$

Onde W_R é o inventário de radionuclídeos liberado (Bq) e as funções (f_x , f_y e f_z) as probabilidades de distribuição gaussiana com médias e desvio padrão respectivamente de $x = \mu t$, $y = z = 0$ e $\sigma_x = 2\varepsilon_x t$, $\sigma_y = 2\varepsilon_y t$ e $\sigma_z = 2\varepsilon_z t$. Esta solução pode ser estendida temporal e espacialmente com variação das fontes de liberação pelos métodos de expansão ou convolução (Halerman, 1987).

Com a dispersão dos radionuclídeos para campos afastados da fonte, as concentrações dos mesmos tendem a tornar-se verticalmente homogêneas. Especialmente em regiões estuarinas de rios e áreas costeiras rasas, onde o diâmetro do corpo de água é superior a 20 vezes a profundidade máxima, a função f_z tende a se aproximar do recíproco da altura da coluna de água ($1/h$). Assim, para dispersão horizontal promediado na vertical (2DH) de uma fonte instantânea, a equação 1 pode ser simplificada para:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mu \frac{\partial C}{\partial x} + \vartheta \frac{\partial C}{\partial y} = \varepsilon_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \varepsilon_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \lambda C \quad (6)$$

Assim, a solução desta equação é:

$$C(x,y,t) = \frac{W_R}{4\pi Bt\sqrt{\varepsilon_x\varepsilon_y}} \exp\left[-\left\{\frac{(x-\mu t)^2}{4\varepsilon_x t} + \frac{y^2}{4\varepsilon_y t}\right\} - \lambda t\right] \quad (7)$$

Onde B é a largura do corpo de água (m).

Nos próximos tópicos serão apresentados os programas mais usados quanto à modelagem em corpos d'água naturais. As referências utilizadas na confecção de cada tópico estão presentes na indicação dos apêndices referentes a cada programa.

2.1 SIMCAT

É um modelo desenvolvido pela agência inglesa do meio-ambiente, utiliza método de Monte Carlo para simular descargas de efluentes, produz resultados em forma estatística para comparação com padrões de qualidade da água. É um modelo unidimensional, em regime permanente que simula descargas pontuais e difusas no leito do rio.

O SIMCAT é capaz de prever o fluxo e a distribuição da qualidade em qualquer ponto selecionado do rio e produzir resultados estatísticos para

comparação com os padrões de qualidade específicas do rio. Isso permite considerar os erros associados com a amostragem dos dados ao invés de erros associados à calibração.

Os principais benefícios do uso SIMCAT como uma ferramenta de planejamento de captação são:

- Software disponível pela Agência de Meio-Ambiente com potencial de futuras atualizações;
- SIMCAT permite uma rápida avaliação das opções de gestão;
- SIMCAT pode ser usado como ferramenta rotineira por pessoal não especializado.

SIMCAT oferece um panorama significativo no comportamento da captação baseado no monitoramento rotineiro do rio e da qualidade do efluente por descargas contínuas. O software é projetado para minimizar as limitações reconhecidas destes dados, para gerar resultados com níveis de confiança para comparação com os padrões de qualidade d'água e os critérios de planejamento.

No apêndice A, encontram-se elencados alguns trabalhos que utilizam este tipo de software.

2.2 PC – QUASAR

Este programa foi desenvolvido pelo CEH (Center for Ecology & Hydrology), Centro para Ecologia e Hidrologia. O modelo apresenta dois modos de execução, modo de planejamento e o modo de previsão dinâmica. Em previsão dinâmica, perfis de parâmetros hidráulicos e de qualidade d'água ao longo do leito do rio são calculados para visualização e análise. Séries temporais para qualquer segmento do rio podem ser obtidas neste modelo. Já

no modo de planejamento, são obtidas freqüências cumulativas e curvas de distribuição para análise posterior em planilha eletrônica.

PC – QUASAR permite uma fácil comparação entre o estado existente do rio e o que existiria depois de uma mudança planejada ou um evento não planejado que tivesse ocorrido na rede do rio. O modelo descreve as mudanças da qualidade da água com o passar do tempo e permite localizar o curso da maré.

Os seguintes elementos podem ser modelados:

- Fluxo do rio
- PH
- Amônia
- Nitrato
- Temperatura
- Demanda bioquímica de oxigênio
- Oxigênio dissolvido
- Conservação do poluente ou traçadores

PC – QUASAR realiza a modelagem do rio com uma série de possibilidades normalmente definidas pelos locais a serem estudados, como, represas, captação de águas públicas e descarte de efluentes.

No apêndice B, encontram-se elencados alguns trabalhos que utilizam este tipo de software.

2.3 MIKE 11

Desenvolvido pelo DHI Water & Environment (Instituto Dinamarquês de Hidráulica), este modelo é referência em simulação do nível da água, escoamento, qualidade da água e transporte de sedimentos em rios, canais de irrigação, reservatórios e outros corpos d'água. Pode ser utilizado em aplicações simples de seleção de opções de projeto, como também em estudos de grande porte para previsão de modos de operação de estruturas hidráulicas complexas.

O módulo hidrodinâmico do MIKE 11 fornece uma biblioteca de métodos computacionais de escoamentos permanentes e transientes para redes de canais em loop e ramificados. O modelo pode ser utilizado para condições de escoamento verticalmente homogêneo e para rios com inclinação acentuada. Escoamentos sub e supercrítico também podem ser representados por um esquema numérico adaptativo.

As equações não-lineares completas para escoamento em canal aberto são resolvidas numericamente entre todos os pontos da grade especificados e adaptativamente no tempo, desde que, as condições de contorno sejam fornecidas.

MIKE 11 é de fácil uso, completamente dinâmico, uma ferramenta de modelagem unidimensional para análise detalhada e gerenciamento. Com esta excepcional flexibilidade, velocidade e ambiente interativo, MIKE 11 provém um ambiente efetivo para engenharia e gerenciamento da qualidade d'água.

O DHI também desenvolveu dois modelos hidrodinâmicos, um em diferenças finitas *MIKE 21 HD* e outro em volumes finitos *MIKE 21 HD FM*. Em Vargas et. al (2001), foi feita uma avaliação da penetração das águas do rio Tubarão na lagoa Imarui e a influência do aterro no canal de Laranjeiras sobre a circulação d'água na mesma.

Foram realizadas duas simulações com auxílio do modelo Mike 21, uma com a situação atual do aterro existente e a outra em que o aterro é removido.

No apêndice C, encontram-se elencados alguns trabalhos que utilizam o software do Instituto Dinamarquês de Hidraulica-DHI.

2.4 QUAL2E

O QUAL2E é distribuído pela EPA – Environmental Protection Agency – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. Ele pode simular, em qualquer combinação, vários constituintes de qualidade de água considerando que estão completamente misturados ao escoamento.

Esses constituintes são: oxigênio dissolvido (OD), temperatura, nitrogênio, amônia, nitrato, um constituinte não conservativo e três constituintes conservativos. Os principais mecanismos de transporte (advecção e dispersão) são considerados significativos apenas ao longo da direção principal do escoamento e desta forma, o modelo considera o sistema como sendo unidimensional.

Podem ser simuladas várias seções de lançamento, captações e de vazões incrementais positivas ou negativas. O sistema pode ser operado como permanente ou dinâmico, naquele, as vazões do curso d'água e dos efluentes são consideradas constantes ao longo do tempo e do espaço, assim como as concentrações dos parâmetros de qualidade e neste, é possível acompanhar o comportamento do curso d'água com relação às concentrações dos poluentes simulados ao longo do tempo, em intervalos de tempo definidos pelo usuário.

Este modelo é largamente utilizado em todo o mundo, havendo diversos exemplos de aplicação no Brasil, onde no apêndice D estão arrolados alguns deles.

2.5 WASP

O Programa de Simulação de Análise da Água foi desenvolvido pela EPA – Environmental Protection Agency – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, para simular os processos de hidrodinâmica e de qualidade de água em 1, 2 e 3 dimensões para avaliar o destino e o transporte de contaminantes convencionais e tóxicos, ciclos de OD/DBO detalhados, nitrogênio e fósforo.

Características do Modelo:

- Transporte de sedimentos
- Tóxicos
- Nutrientes
- Oxigênio dissolvido
- Eutroficação
- Conservação do poluente ou traçadores.

As equações que regem o modelo são as da advecção, dispersão e reação, para as variáveis de qualidade d'água. O WASP provê a solução da advecção e dispersão e a EUTRO e o TOXI, provêm a solução da reação de oxigênio dissolvido, nutrientes e algas. As variáveis de qualidade da água podem estar inseridas ou não, dependendo da necessidade da modelagem.

No apêndice E, encontram-se elencados alguns trabalhos que utilizam este tipo de software.

2.6 SISBAHIA

O Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBahia), é um software profissional de modelos computacionais desenvolvido pela Engenharia Costeira e Oceanográfica do Programa de Engenharia Oceânica do COPPE/UFRJ. Novas versões do SisBAHIA têm sido continuamente implementadas desde 1987, com ampliações de escopo e aperfeiçoamentos feitos através de várias teses de mestrado e doutorado, além de projetos de pesquisa.

Ele utiliza elementos finitos na discretização espacial e diferenças finitas na discretização temporal. Em linhas gerais, os modelos comportados pelo SisBaHIA são (Rosman, 2009):

- Modelo Hidrodinâmico;
- Modelos de Qualidade de Água e Eutroficação;
- Modelos de Transporte de Sedimentos e Evolução Morfológica do Fundo;
- Modelo de Transporte Euleriano;
- Modelo de Transporte Lagrangeano – Determinístico ou Probabilístico;
- Modelo de Campo Próximo para Emissários e Fontes Pontuais;
- Modelo de Geração e/ou Propagação de Ondas;
- Módulo de Análise e Previsão de Marés;

Estes modelos podem ser usados para simulação tridimensional (3D) e bi-dimensional (2DH). Neste módulo, o modelo utiliza as equações governantes do modelo 3D integradas analiticamente na dimensão vertical, ou seja, promediado na vertical.

O sistema foi desenvolvido de forma a torná-lo de fácil manuseio pelo usuário. A partir deste programa podem ser acessados outros programas que auxiliam o modelo, como, *Argnus One* que gera malhas; *Surfer* para geração de mapas com campo de velocidades e plumas de constituintes; *Grapher* para geração de gráficos de elevação e velocidade (módulo e direção) e um programa para animação dos resultados de campo da simulação, velocidade e do desenvolvimento da pluma de um constituinte qualquer.

O sistema computacional SisBAHIA, possui um número grande de trabalhos realizados em diversas áreas do conhecimento, onde estes, estão arrolados no apêndice F. Por ser o software de uso desta dissertação, apresenta-se abaixo a equação da conservação de massa que é resolvida pelo modelo de transporte Euleriano 2DH do SisBAHIA.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mu_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(h D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - (\lambda C + K_s) C + q_s (C_s - C); i, j = 1, 2 \quad (8)$$

Onde: C = Concentração promediada ao longo de h(x,y,t)

h(x,y,t)= Elevação da coluna de água

μ_i = Velocidade do componente na direção x_i promediada em h

$D_{ij}(x,y,t)$ = Difusão turbulenta e tensor de dispersão promediado em h

$K_s(x,y,t)$ = Taxa de remoção de massa devido à deposição

$q_s(x,y,t)$ = Descarga por unidade de área horizontal na região da fonte

$C_s(x,y,t)$ = Concentração na região da fonte

A taxa de remoção da fonte devido ao processo de deposição de sedimentos é computada da seguinte forma:

$$K_S = \frac{-\ln(0.1)}{h/V_S} \quad (9)$$

Se

$$\left(\frac{\tau_o}{\tau_{oc}} \leq 1 - a\right) \text{ ou } \left(\frac{\tau_o}{\tau_{oc}} - 1 + a < 2a \times R[0,1]\right)$$

$$K_S = 0.0 \quad (10)$$

Se

$$\left(\frac{\tau_o}{\tau_{oc}} \geq 1 + a\right) \text{ ou } \left(\frac{\tau_o}{\tau_{oc}} - 1 + a > 2a \times R[0,1]\right)$$

Onde V_S é uma constante característica da velocidade de deposição do sistema dada pelo usuário, $\tau_o(x,y,t)$ é a tensão exercida pelo fluxo no fundo da camada de água de espessura h , τ_{oc} é a tensão crítica de fundo necessária para mobilizar partículas depositando com velocidade V_S . O parâmetro a é usado para arbitrar uma tolerância no cálculo da remoção e $R[0,1]$ é um número aleatório com valores entre 0 e 1.

Se o usuário prescrever valores de V_S , τ_o , τ_{oc} e a , o modelo calcula K_S , o qual varia no tempo e no espaço. Quando $\tau_o/\tau_{oc} < (1 - a)$ a turbulência é fraca e a deposição ocorre, porém quando $\tau_o/\tau_{oc} > (1 + a)$, a turbulência é muito forte e não existe deposição ($K_S = \text{zero}$). Quando $(1 - a) < \tau_o/\tau_{oc} < (1 + a)$, o processo de deposição se torna probabilístico. Observa-se que se $\tau_o/\tau_{oc} = 1$, há 50 % de chance de ocorrer deposição. Quando $\tau_o/\tau_{oc} \rightarrow (1 - a)$, a

probabilidade de deposição aumenta, enquanto que se $\tau_o/\tau_{oc} \rightarrow (1 + a)$, a mesma diminui.

A remoção de massa da coluna de água somente ocorre, em uma dada posição, se o fluxo é suficiente laminar para permitir a deposição. O uso do valor de tolerância (a) leva em conta o fato de que critérios usuais de definição dos tensores de fundo não são exatos. Assim, em uma situação de fluxo inerte, aproximadamente 90 % das partículas suspensas serão depositadas após período igual ao tempo máximo de deposição da partícula ($= h/V_S$). Teoricamente, a deposição seria de 100 %, portanto o modelo se aproxima de forma mais razoável da realidade, apesar de continuar sendo conservativo.

3. ANGRA III – VISÃO GERAL

A terceira unidade da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto contará com um reator PWR do mesmo tipo daquele que se encontra em operação na unidade 2. Assim, esse capítulo tem como base de informação os documentos da Natrontec (1998), EIA-RIMA de Angra 2 – Estudo de Impacto Ambiental, volumes 1,2,3 e 5 e o Relatório de Impacto Ambiental, bem como o Final Safety Analysis Report – FSAR (2010) – Angra 2.

O reator PWR de Angra II resfriado e moderado à base de água leve pressurizada a 157 bar, com potência térmica de 3.765 MWt e potência elétrica de aproximadamente 1.300 MWe, compõe-se basicamente de um vaso de pressão e um núcleo. Na figura 1 encontra-se esta configuração.

O vaso de pressão é um cilindro com 5 metros de diâmetro interno, 9,8 metros de altura, 25,6 centímetros de espessura e pesando 506 toneladas, fabricado em aço forjado de baixa liga e granulação fina, com revestimento interno em aço inoxidável. A tampa do vaso e a parte superior da estrutura de suporte e fixação do núcleo são removíveis para permitir a recarga dos elementos combustíveis. O calor proveniente do processo de fissão do combustível é gerado no núcleo do reator.

O núcleo é formado pelas estruturas de suporte dos 193 elementos combustíveis que são justapostos de modo a formar uma geometria aproximadamente octogonal e pelas barras de controle.

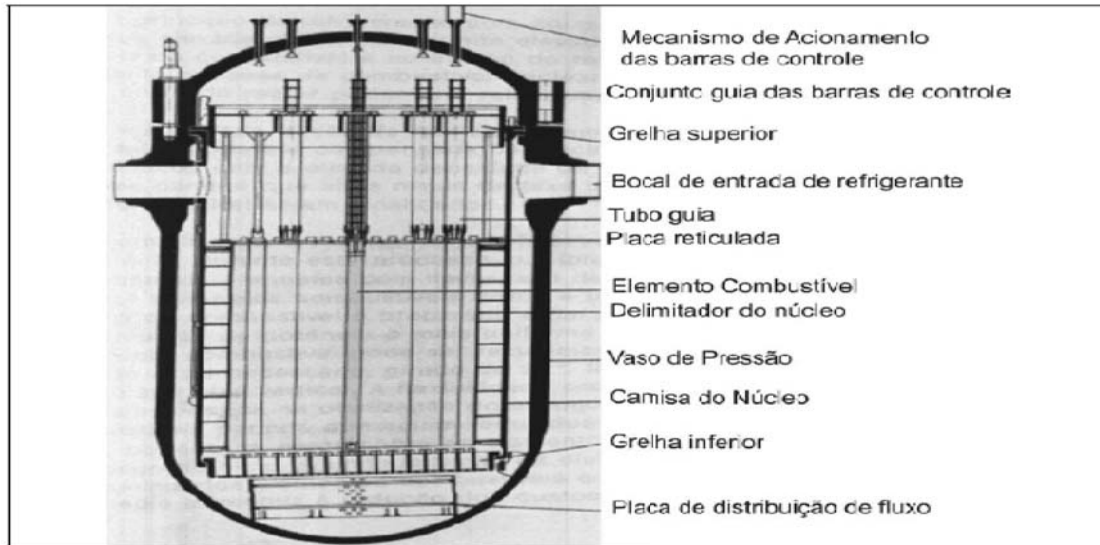


Figura 1 – Corte longitudinal do reator. Fonte: NATRONTEC (1999a).

O combustível nuclear do reator é o urânio enriquecido, presente na forma de pastilhas cerâmicas de dióxido de urânio de formato cilíndrico tendo cada pastilha 9,11 mm de diâmetro e 11 mm de altura, empilhadas no interior de tubos fabricados de uma liga de zircônio e estanho. Esses tubos, denominados varetas de combustível, são hermeticamente fechados e internamente pressurizados com gás hélio, que reduz as tensões e deformações durante a operação nuclear.

As varetas de combustíveis são montadas em elementos combustíveis, cada um com 3,9 metros de altura e 832 kg de peso, onde 542 kg desse peso corresponde ao urânio. O núcleo completo de combustível nuclear é constituído de um total de 193 elementos combustíveis, cada um deles com 236 varetas de combustível e 20 tubos-guia distribuídos em arranjos de 16x16 unidades e mantidos no lugar por grades espaçadoras.

As barras de controle (61 unidades) são utilizadas para controlar a potência e possibilitar o rápido desligamento do reator, sendo distribuídas em

grupos de 20 varetas absorvedoras presas pela extremidade superior a uma peça que é chamada de *Aranha*.

As varetas absorvedoras movimentam-se verticalmente dentro de tubos-guia situados no interior de 61 dos 193 elementos combustíveis, e são fabricadas com uma liga fortemente absorvedora de nêutrons, composta de 80% de prata, 15% de índio e 5% de cádmio. Cada barra de controle é acionada por um mecanismo eletromagnético montado sobre a tampa do vaso do reator.

O rápido desligamento do reator, interrompendo instantaneamente a reação em cadeia, ocorre com a queda por gravidade, dentro do núcleo, de todas as barras de controle, mediante a interrupção da corrente elétrica nas bobinas de atracamento desses mecanismos.

Os elementos combustíveis e suas respectivas barras de controle podem ser retirados e recolocados como uma unidade integrada durante o recarregamento do núcleo do reator.

3.1 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO DO REATOR

O sistema de refrigeração do reator serve para remover o calor liberado pelo combustível nuclear – 3.765 MWt – e aquele proveniente da dissipação de potência das quatro bombas de refrigeração do reator – 17 MWt –, e transportá-lo para os quatro geradores de vapor.

O líquido refrigerante funciona também como moderador, que serve para reduzir a velocidade dos nêutrons, de modo a propiciar condições adequadas para a fissão nuclear e, através da adição de boro na água, reduzir o número de nêutrons e dessa forma controlar e/ou extinguir a reação em cadeia.

O refrigerante é circulado com vazão de 18.800 kg/s através de 4 circuitos fechados, cada um contendo uma bomba centrífuga vertical de um

estágio, possuidora de grande vazão e acionada por motor elétrico de velocidade constante denominada *bomba de refrigeração do reator*, e um gerador de vapor que troca calor com a água do ciclo secundário.

O refrigerante entra pela parte inferior do núcleo à temperatura aproximada de 291,3 °C e sai pela parte superior a 326,1 °C, com o reator a plena potência, sendo mantido na condição de líquido sub-resfriado a uma pressão constante de 157 bar por meio de um pressurizador localizado em um dos circuitos de refrigeração do reator.

É no pressurizador que se localiza a única região do ciclo primário contendo vapor e líquido saturado, e é através da vaporização desse líquido com aquecedores elétricos e condensação do vapor por meio de um sistema de borriço de água, que se mantém constante de modo automático a pressão do sistema de refrigeração, de modo a absorver os eventuais surtos do sistema, contração e expansão do refrigerante, provocados por desequilíbrios entre a potência do reator e a carga do grupo turbina-gerador elétrico.

Na figura 2, tem-se uma perspectiva isométrica do sistema de refrigeração do reator, mostrando o vaso de pressão do reator, os geradores de vapor, as bombas de refrigeração do reator e o pressurizador. Os geradores de vapor são instalados a uma cota superior à do reator, para promover o resfriamento natural do núcleo no caso extremo de perdas das quatro bombas.

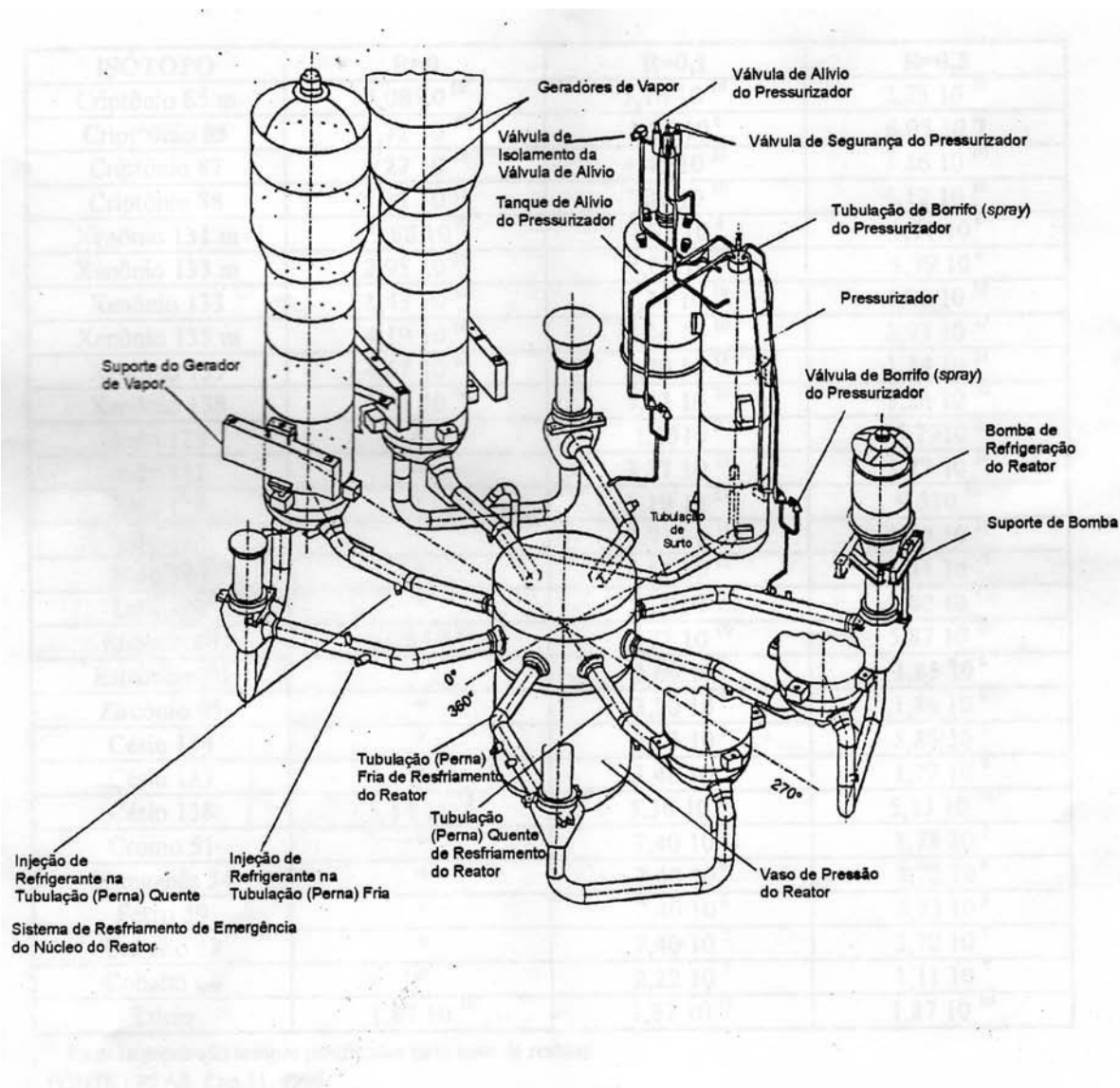


Figura 2 – Perspectiva Isométrica do Sistema de Refrigeração do Reator.

Fonte: NATRONTEC (1999a).

O sistema de refrigeração do reator é fechado e separado dos circuitos de água e vapor do ciclo secundário, constituindo-se em uma das barreiras contra a liberação de radioisótopos para o meio ambiente, tornando desnecessária a blindagem radiológica da turbina a vapor.

A água de circulação, que compõe o terceiro ciclo, separado dos ciclos primário e secundário, é utilizada para condensação do vapor de exaustão das

turbinas de baixa pressão. A água utilizada neste ciclo é retirada do mar na enseada de Itaorna, em pontos de captação próximos as usinas (40 m³/s para Angra 1 e 77 m³/s para Angra 2, com a mesma vazão prevista para Angra 3). Atualmente a água desse circuito é descarregada integralmente no Saco de Piraquara de Fora (SPF) na Baía da Ribeira, sendo que a vazão de lançamento e captação é de 117 m³/s, considerando as duas unidades da CNAAA. A figura 3 mostra o sítio de Angra 3 que, apesar de ainda não ter sido licenciado para operação, prevê a captação e o lançamento dessas águas em Itaorna. Para evitar recirculação foi proposto o fechamento do molhe atual junto a nova planta (A3) e a descarga da mesma em Itaorna (Si) além de Piraquara de Fora (Sp) que continuaria descarregando a captação atual (A1 e A2).

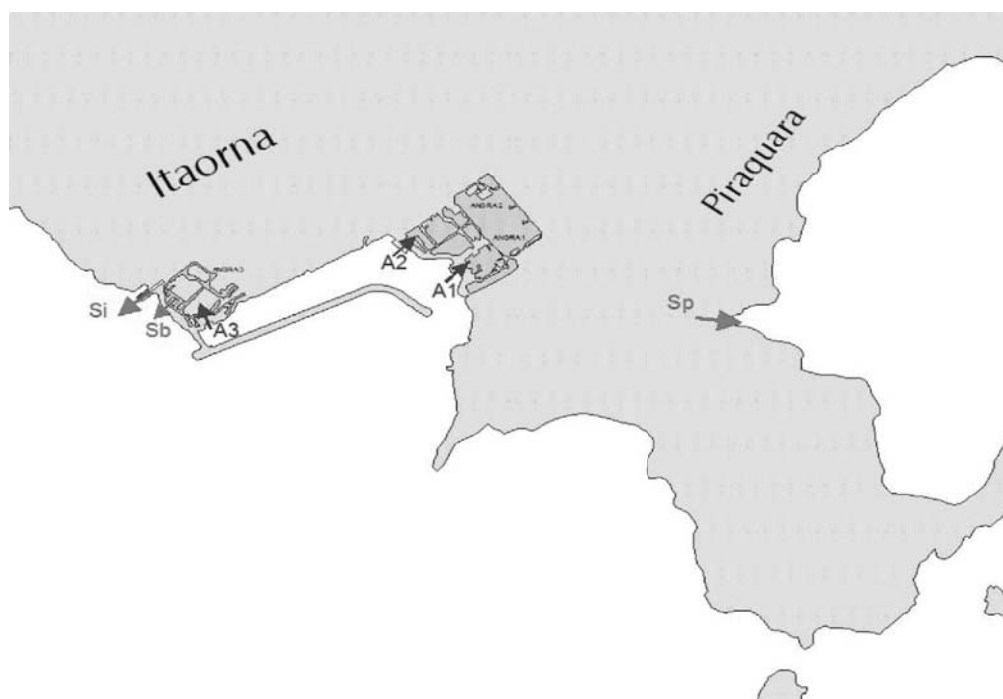


Figura 3 – Localização da CNAAA mostrando as captções e descargas previstas com a entrada em operação do futuro sítio de Angra 3.

Fonte: Software Surfer.

3.2 SISTEMAS DE RESFRIAMENTO DE EMERGÊNCIA

O Sistema de Resfriamento de Emergência do núcleo, figura 4, consiste de um conjunto de subsistemas independentes e redundantes de injeção de água com alta concentração de boro, por meio de bombas de alta pressão, dos acumuladores e por meio de bombas de baixa pressão, e é projetado para inundar o núcleo do reator com água borada logo após a ocorrência de rupturas no Sistema de Refrigeração do Reator, com perda de refrigerante – LOCAs.

Os acumuladores são tanques que contêm água borada pressurizada por atmosfera de nitrogênio, com volume suficiente para resfriar o núcleo do reator por tempo suficiente, durante a despressurização e escoamento do sistema de refrigeração do reator através da ruptura, até que a pressão caia ao nível de entrada em operação do subsistema de Remoção de Calor Residual.

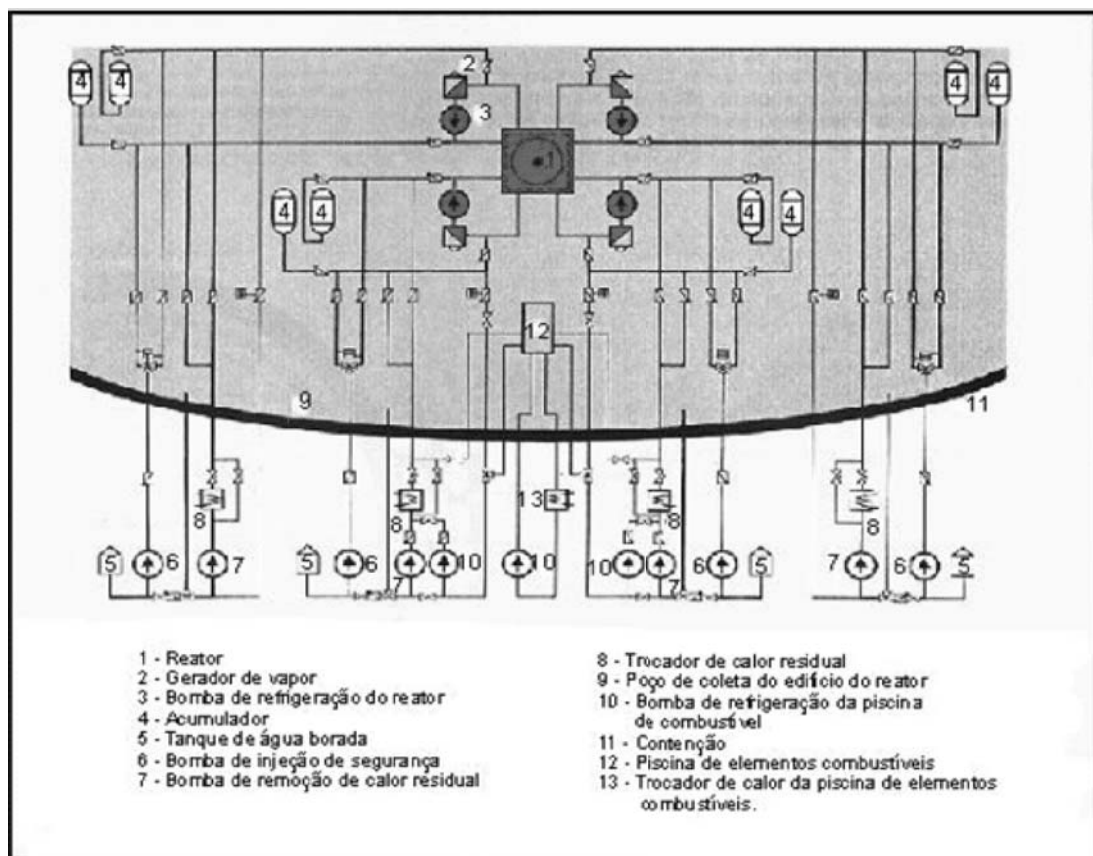


Figura 4 – Conexões dos Trens dos Sistemas de Resfriamento de Emergência do Núcleo no Sistema de Refrigeração do Reator.

Fonte: NATRONTEC (1999a).

O *Subsistema de Remoção de Calor Residual* usa bombas de remoção do calor residual para prover o resfriamento do núcleo com água dos tanques de armazenamento de água borada e, a seguir, do poço de drenagem da *Esfera de Contenção*, após a ocorrência de LOCAs de grandes proporções com despressurização acentuada do *Sistema de Refrigeração do Reator*.

3.3 ORIGEM DOS ELEMENTOS RADIOATIVOS

Todos os elementos radioativos produzidos em uma usina nuclear têm sua origem no núcleo do reator ou em suas imediações. Os dois grandes processos responsáveis pela sua presença são a fissão nuclear e a ativação por nêutrons.

Na fissão do urânio os elementos resultantes são denominados de *produtos de fissão* e estes são os grandes responsáveis pela radioatividade, porém como são produzidos no interior do combustível, para que possam contaminar a água do primário, esses produtos de fissão têm que atravessar a própria barreira cerâmica das pastilhas combustível deslocando-se por meio de difusão até atingirem o espaço livre entre elas e a parede da vareta combustível.

Este processo é muito lento, de modo que apenas uma fração muito pequena do inventário consegue fazê-lo. Uma vez vencida essa etapa, uma passagem para a água do primário só é possível se alguma vareta apresentar defeito, perdendo sua estanqueidade. Apesar dos rigorosos controles exercidos nas fases de projeto, a incidência desses defeitos provoca o acúmulo de radionuclídeos resultantes da liberação do combustível, tais como ^{137}Cs , ^{134}Cs e ^{90}Sr , ^{88}Kr , ^{87}Kr e ^{85}Kr , que contribuem para o inventário do refrigerante. O trício (^3H) é produzido como produto de fissão ternária no combustível e chega igualmente ao refrigerante por difusão tal como os demais produtos de fissão.

A ativação por nêutrons pode se dá dentro do combustível ou fora dele, bastando para isso a presença de um fluxo neutrônico. Os isótopos radioativos produzidos fora do combustível podem ter duas origens. A primeira é a partir de elementos estáveis que constituem o próprio refrigerante primário ou que nele estão dissolvidos, onde podemos citar o nitrogênio (^{16}N), produzido do oxigênio da água, e o trício (^3H), produzido a partir do ácido bórico diluído no refrigerante para efeito de controle.

A segunda é a partir de elementos, também estáveis, que constituem os materiais em contato com o refrigerante ou dos demais sistemas a ele conectados. Esses elementos entram na água do primário por processos de erosão e corrosão que quando passam pelo núcleo, são ativados. Entre estes produtos estão o ferro (^{59}F), cobalto (^{60}Co) e o manganês (^{54}Mn).

Na tabela 1 encontram-se as concentrações dos principais radionuclídeos, utilizados na simulação, presentes no sistema de refrigeração do reator de Angra 2, operando a 100%.

Tabela 1 – Concentração dos radionuclídeos (Bq / m³), utilizados na simulação, com purificação de 0,1 h.

ISÓTOPOS	Bq/m ³
TRÍCIO	$1,87 \times 10^{10}$
CÉSIO-137	$3,48 \times 10^8$
COBALTO-60	$2,22 \times 10^7$

Fonte: FSAR (2010).

Para fins de purificação e desgaseificação, uma parte do fluxo total de água de refrigeração que circula no reator é extraída continuamente pelo sistema de controle de volume, purificada em leito de resinas trocadoras de íons contidas em filtros de leito misto e reinjetada no sistema de refrigeração do reator.

Um dos leitos é carregado com Li^+ e o outro com H^+ . O trocador de lítio é o mais usado e quando é preciso reduzir a concentração de lítio ou cério, o trocador de H^+ é posto em operação. Entretanto, como essas resinas trocadoras de íons não podem reter gases nobres, como são os radioisótopos de xenônio e de criptônio produzidos na fissão nuclear, nem oxigênio gasoso livre, produzido por radiólise da água no núcleo do reator, assim como não podem reter hidrogênio gasoso, injetado na água de refrigeração com a finalidade de reduzir a presença de oxigênio livre nesse líquido, a extração desses gases é feita pelo desgaseificador conectado ao sistema de controle de volume após o sistema de purificação.

Esses mesmos gases são também extraídos continuamente, através do arraste com nitrogênio gasoso de todos os sistemas auxiliares que contém água de refrigeração do reator, e posteriormente, enviados para o sistema de tratamento de rejeitos gasosos radioativos.

3.4 ACIDENTES COM PERDA DE REFRIGERANTE – LOCA

Os acidentes de base de projeto mais críticos são os associados com a perda do refrigerante que faz a refrigeração do núcleo do reator. O *Loss of Coolant Accident* – LOCA, varia de pequenos vazamentos até grandes rupturas nas tubulações do Sistema de Refrigeração do Reator.

A pior sequência é a ruptura tipo guilhotina, LBLOCA, de uma das tubulações do Sistema, resultando no escoamento do refrigerante por ambas

as extremidades da ruptura. O refrigerante escoar em poucas dezenas de segundos e, embora a reação nuclear seja interrompida, o núcleo do reator pode ficar descoberto e o calor de decaimento provocar um aumento descontrolado de sua temperatura, colocando em perigo a integridade do núcleo, com possibilidade de acarretar a sua fusão se o sistema de resfriamento de emergência não operar de acordo com o projeto.

Segundo Estudos de Impacto Ambiental – EIA, (Natrontec, 1998), os eventos iniciadores do tipo LOCA são:

- a. Vazamentos na tubulação do sistema de refrigeração do reator;
- b. Vazamentos no pressurizador;
- c. Vazamentos na tubulação de conexão do sistema de refrigeração do reator fora da Contenção;
- d. Vazamentos nos tubos de gerador de vapor.

No entanto, é importante ressaltar que sequências de acidentes com falha total de um ou mais sistemas de segurança, geralmente não levam a uma fusão imediata do núcleo do reator. Na maioria dos casos, tais sequências envolvem uma deterioração gradual da capacidade de resfriamento do núcleo.

Análises termo-hidráulicas, (Natrontec, 1999a), mostram que do início do acidente até o início da fusão do núcleo, existe um período de tempo que possibilita intervenções extras dos operadores. Esse tempo pode ser utilizado para a tomada de medidas de gerenciamento de acidente, a fim de restaurar o resfriamento do núcleo do reator e a remoção do calor residual antes que o combustível comece a se fundir. Na tabela 2 encontram-se as probabilidades de ocorrência de alguns eventos.

Tabela 2 – Frequências de Eventos Iniciadores de LOCA, de Falhas no Sistema de Segurança e de Fusão do Núcleo do Reator.

Nº	Eventos Iniciadores de Acidentes de perda de refrigerante	Seção Transversal de Vazamento(cm ²)	Frequência /ano Evento inicial	Probabilidade de Falha dos Sistemas de Segurança /demanda	Frequência dos cenários acidentais não atendidos por funções de segurança/ano
Vazamento na tubulação de refrigerante do reator					
1	Grande e Médio vazamentos	> 200	$< 10^{-7}$	$< 3,0 \times 10^{-3}$	$< 10^{-8}$
2	Pequeno vazamento 1	80 - 200	$9,0 \times 10^{-5}$	$3,5 \times 10^{-3}$	$3,1 \times 10^{-7}$
3	Pequeno vazamento 2	50 - 80	$7,5 \times 10^{-5}$	$3,3 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-7}$
4	Pequeno vazamento 3	25 - 50	$7,5 \times 10^{-5}$	$3,3 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-7}$
5	Pequeno vazamento 4	12 - 25	$1,4 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-7}$
6	Pequeno vazamento 5	2 - 12	$2,8 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$	$3,0 \times 10^{-6}$
Vazamento no Pressurizador causado por transientes operacionais					
7	- Falha na água de alimentação principal	20	$3,2 \times 10^{-5}$	$2,8 \times 10^{-3}$	$9,0 \times 10^{-8}$
8	- Falha da fonte fria principal	20	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \times 10^{-2}$	$5,3 \times 10^{-7}$
9	- Outros transientes	20	$1,2 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-7}$
10	Pequeno vazamento no pressurizador devido a abertura indevida da válvula de segurança	40	$8,5 \times 10^{-4}$	$2,6 \times 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$
11	Vazamento em linha de conexão no annulus - LOCA de Interface	2-500	$< 10^{-7}$	1	$< 10^{-7}$
Vazamento em tubo do gerador de vapor					
12	Pequeno vazamento 1	6-12	$1,0 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-7}$
13	Pequeno vazamento 2	1-6	$6,5 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-6}$
1-13	Total (seqüências de acidentes causados por perda de refrigerante)				$1,1 \times 10^{-2}$

Fonte: BUCHNER (1990).

4. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA BAÍA DA ILHA GRANDE

4.1 LOCALIZAÇÃO

A baía da Ilha Grande está localizada entre os meridianos 44°W e 44° 40'W e entre as latitudes 23°S e 23°40'S, compondo um sistema estuarino com a baía de Sepetiba. Está inserida numa área relativamente bem preservada e é considerada uma região importante. Possui uma diversidade de ecossistemas marinhos, sendo em grande parte rodeada por costões, ilhas, praias arenosas e manguezais.

Esta região abriga os territórios dos municípios de Parati e Angra dos Reis, que juntos registram 123.000 habitantes em 1998, com uma taxa de crescimento de 28% entre 1980 e 1991 (Costa, 1998). Em virtude da beleza paisagística da região, sua principal vocação natural concentra-se no turismo e lazer náutico, porém, a interferência humana nestes sistemas naturais vem provocando severas modificações nos atributos físico, químico e biológico.

No canal central da baía 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. No trabalho de Mahiques (1987), ele propôs a divisão fisiográfica da baía em porção Leste, porção Oeste e canal central. Na figura 5 podemos ver esta divisão.

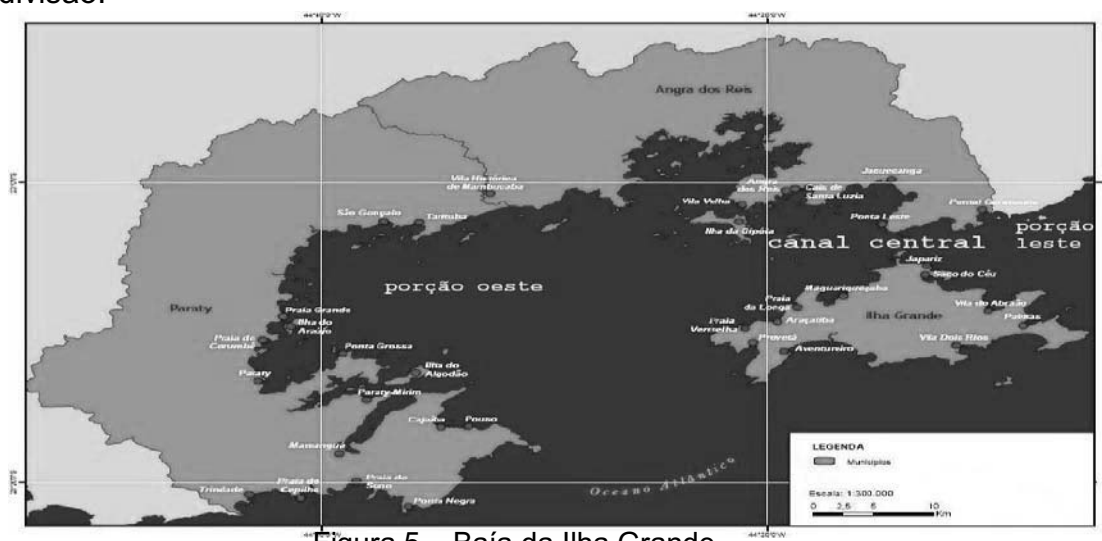


Figura 5 – Baía da Ilha Grande.

Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Soares (2010).

4.2 HIDROGRAFIA

A bacia hidrográfica da região caracteriza-se pelo contato da Serra do Mar com o oceano, sendo as planícies costeiras pouco desenvolvidas ou mesmo inexistentes. 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 km², o que corresponde a 78% da área total da bacia hidrográfica local. Na tabela 3 encontram-se os rios mais expressivos dentro da área de influência direta que corresponde 15 km de raio, a partir da Central Nuclear.

Tabela 3 – Rios mais expressivos da área de influência direta.

Rio	Extensão (Km)	Cota das Nascentes (m)	Declividade Média (m/Km)
Jacuecanga	10,3	1.400	136
Japuíba	12,5	1.400	112
Ariró	17,5	1.100	63
Paca grande/Bracuí	31,5	1.500	48
Grataú	10,3	1.200	116
Frade	6,0	600	100
Mambucaba	58,0	2.000	34
Barra grande	15,0	1.500	100
Pequeno	15,1	1.500	100
Pequeno Açú	21,0	1.500	71
Mateus Nunes	15,0	1.200	80
Parati Mirim	22,0	800	36

Fonte: Natrontec (1998)

4.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO RIO MAMBUCABA

O rio Mambucaba apresenta suas nascentes no platô da serra da Bocaina, no estado de São Paulo, seus inúmeros afluentes apresentam pequenas extensões, com exceção do rio do Funil que possui extensão da ordem de grandeza de seu curso principal. A área da bacia hidrográfica é de 757 km² e o perímetro é de aproximadamente 155 km (Natrontec,1998).

A densidade de drenagem varia diretamente com a extensão do escoamento superficial e fornece, portanto, uma indicação da eficiência da drenagem natural da bacia. As bacias com maior densidade de drenagem tenderão a estar mais sujeitas a cheias do que as bacias com menor densidade de drenagem. Uma bacia com densidade de drenagem igual ou superior a 2 é bem drenada e igual a 1 é mal drenada. A bacia do rio Mambucaba apresenta a densidade de drenagem igual a 0,86, este índice é considerado baixo indicando que esta bacia é mal drenada (Natrontec, 1998).

A sinuosidade é a relação entre a extensão do curso d'água e a distância em linha reta entre a nascente e a foz do mesmo curso. Uma sinuosidade inferior a 2 significa que o rio é pouco sinuoso, se for superior a 2 indica que o rio é sinuoso, o rio Mambucaba possui sinuosidade igual a 1,57, o que indica que o mesmo é pouco sinuoso.

A fim de caracterizar o regime sazonal do rio, as vazões médias, máximas e mínimas mensais foram estabelecidas em um fluxograma apresentado na figura 6. As medições de vazões foram obtidas junto ao Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica-DNAEE.

Segundo o fluxograma, 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 41m³/s e a vazão máxima chega a 157m³/s. O período de estiagem corresponde aos meses de junho a outubro, sendo os meses de agosto e setembro os mais secos, sendo 14 e 10m³/s as vazões médias e mínimas para estes dois meses.

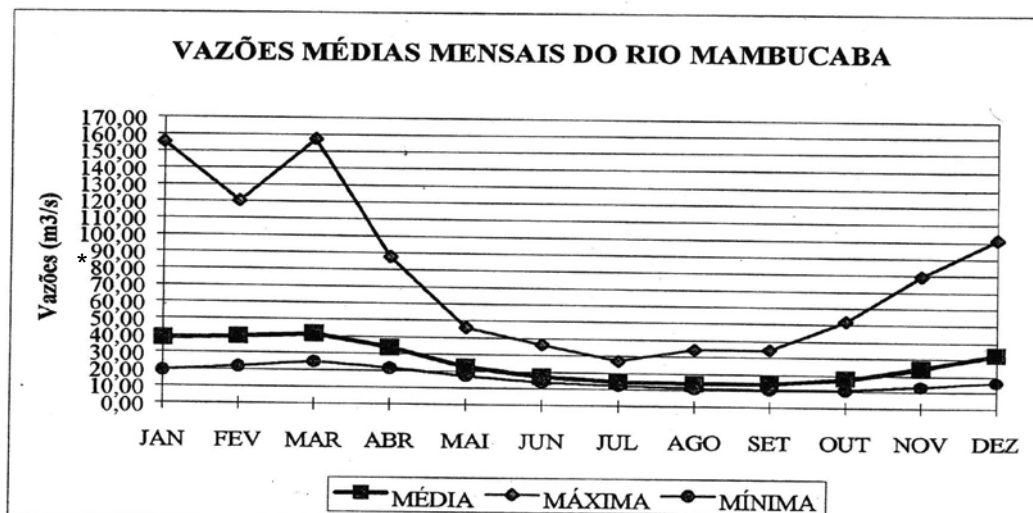


Figura 6 – Vazão média mensal do rio Mambucaba.

Fonte: Natrontec (1998)

4.2.2 ONDAS

As ondas na baía da Ilha Grande podem ser geradas por ventos locais, ou oriundas de águas profundas. Essas últimas representam as maiores ondas que podem ocorrer no local. 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, 2002).

As ondas mais frequentes 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 frequentes na primavera (12, 14 e 15%, respectivamente). As alturas mais frequentes 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 baía da Ilha Grande 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, 2002).

4.2.3 MARÉS

As marés são oscilações verticais periódicas das massas líquidas da superfície terrestre, se caracterizam como um movimento harmônico composto, podendo assim ser decomposto em diversos movimentos harmônicos simples. As marés podem ser divididas em astronômicas e meteorológicas, diferentes entre si, principalmente, devido à forma de geração e ao período de duração.

As primeiras são geradas pelas forças gravitacionais que o Sol e a Lua exercem sobre a Terra, sendo traduzidas em elevações do nível do mar com períodos de oscilação cerca de 12,42 horas, correspondendo às marés semi-diurnas, ou 24 horas, correspondendo às marés diurnas. Quando Sol, Lua e Terra estão alinhados, situações correspondentes às fases de lua nova e lua cheia, as atrações que estes corpos celestes exercem sobre a massa líquida presente na superfície da Terra são somadas, gerando preamares mais altas e baixa-mares mais baixas, essas são as chamadas marés de sizígia (Natrontec, 1998).

Nas situações de lua crescente e lua minguante, a conjunção Sol, Terra e Lua formam um triângulo no qual a Terra posiciona-se no ângulo reto, nessa

situação, as forças de atração estão defasadas, o que gera preamares e baixamares de menor amplitude, também conhecidas como marés de quadratura.

A maré meteorológica representa os efeitos causados por variações na pressão atmosférica ocasionada, principalmente, devido à aproximação de sistemas frontais, que causam o empilhamento ou afastamento de massa d'água junto à costa em decorrência dos ventos, e de acumulação de água por ação das ondas. A maré meteorológica pode ter a duração da ordem de dias. Diferente da maré astronômica que é previsível, a maré meteorológica tem caráter aleatório.

Para as simulações do modelo da BIG são consideradas marés sintéticas geradas a partir das constantes harmônicas de Angra dos Reis, obtidas no site da FEMAR. A especificação da altura da maré para os contornos foi calculada a cada passo de tempo utilizando as constantes harmônicas apresentada na Figura 7.

SisBaHiA 8.0 - Malhas & Domínios de Modelagem

Nome: 5. Malha Angra-123 sem molhe_C4

Informações | Nós | Elementos | Fronteiras | Constantes Harmônicas | Observações

Constantes de Maré

Constante	Período (seg)	Amplitude (m)	Fase (rad)
MN4	22569.02607322	0.0144	6.0327
M3	29809.44292906	0.0121	3.4137
K1	86164.09076147	0.0535	2.4888
P1	86637.20458000	0.0171	2.2640
2N2	46459.34813490	0.0098	2.2611
N2	45570.05368141	0.0356	2.1349
MS4	21972.02140437	0.0165	2.0408
MK4	21941.46719154	0.0054	1.9619
mu2	46338.32748471	0.0155	1.7054
L2	43889.83274041	0.0164	1.6310
O1	92949.62999305	0.0967	1.4629
S2	43200.00000000	0.1649	1.4396
M2	44714.16439359	0.2869	1.3799
K2	43082.04523752	0.0516	1.2908
Q1	96726.08402232	0.0270	1.0818
M4	22357.08219679	0.0332	0.5664
2MK6	14718.85192155	0.0064	0.5356
M6	14904.72146453	0.0079	0.3824
2MN6	14998.62201896	0.0075	0.1110

Maré Meteorológica

Período (seg.) Amplitude (m) Fase (rad) Mult. de defasagem

1296000.00 0.0000 0.1000 100.00

Importar... Exportar... Visualizar... Surfer...

Busca: []

Início: 11:07 Projeto: Baía Ilha Grande_PENO4841 30/12/2010 11:54

Figura 7 – Constantes harmônicas utilizadas. Fonte: Software SisBahia.

4.2.4 CIRCULAÇÃO

A circulação do sistema estuarino formado pelas baías da Ilha Grande e Sepetiba é resultante de efeitos de marés, ventos e diferenças de densidade. No aspecto geral, a situação gerada pelo contato entre a água do rio e a água do oceano, bem como a mistura por águas de maré, gera um movimento quase permanente em torno da Ilha Grande, com velocidade de 10 cm/s, atribuído a diferenças de densidade. Neste fluxo horário, a água entra na baía da Ilha Grande pelo lado oeste, circula e se mistura com as águas menos salinas provenientes da baía de Sepetiba a leste, sendo desviada para o oceano. (Natrontec,1998)

A corrente de maré na baía da Ilha Grande é fraca, de poucos cm/s, uma partícula levaria 7 dias ou 14 ciclos de maré para ir da entrada oeste à leste em situação favorável (Natrontec, 1998). Devido à deriva causada pelos ventos, essa deriva corresponde a 3% da intensidade do vento, as correntes superficiais na baía da Ilha Grande são geralmente maiores que as de profundidade, sendo que na ilha Guaíba a componente de maré intensifica a corrente.

As correntes de maré adentram na baía da Ilha Grande tanto pelo lado oeste quanto pelo lado leste, antes da preamar. Durante a entrada de maré, o fluxo a oeste sofre um alinhamento e segue para o estreito, depois da preamar a corrente do lado oeste passa pelo estreito em direção leste, enquanto outra corrente sai da baía de Sepetiba em direção ao oceano. Durante a maré baixa, a situação ainda se mantém, com um giro horário na baía da Ilha Grande, saindo pelo lado oeste da baía de Sepetiba e o fluxo passa lateralmente pela Ilha Grande até a abertura a leste do canal.

Baseado nos relatórios, FEMAR (1972b) e ENCAL (1982), campanhas de medições de correntes realizadas nas enseadas de Itaorna, Mamede e no Saco de Piraquara de Fora, indicam valores muito baixos de velocidade, obtendo-se nestes o valor de 0,05 nós (2,5 cm/s), para a corrente máxima correspondente a uma amplitude de maré padrão de 70 cm. O relatório mostra

que medições realizadas no Saco de Piraquara de Fora, próximas a descarga da usina, indicaram velocidades de 1 a 3 cm/s, sem que houvesse correlação com as direções verificadas. Isto mostra que a circulação induzida pela maré nas proximidades da usina é bastante reduzida.

Desta forma, pode-se inferir que a circulação de modo geral é fortemente influenciada pelas correntes que ocorrem no sentido horário, provenientes da porção oeste. Para a porção leste, a falta de um melhor conhecimento dos processos físicos que atuam na região impossibilitam a melhor descrição dos movimentos de águas que se misturam com as águas da baía de Sepetiba e fluem para o oceano pela abertura existente entre a Ilha Grande e a Ponta da Marambaia. (NATRONTEC, 1998).

4.3 BATIMETRIA

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), apresentando como média das profundidades, valores situados entre as isóbatas de 20 e 30 metros. A profundidade aumenta gradativamente em direção ao oceano, com 33 metros de profundidade na entrada da baía, que possui 17,6 km de extensão.

A porção central, vide figura 5, caracterizada por uma área de estreitamento, entre o continente e a Ilha Grande, apresenta-se como a porção mais profunda da baía, onde a curva de 20 m se alarga, definindo os contornos norte e sul do canal. Nesta porção é marcante a presença deste canal, orientado no sentido NE-SW, com profundidades maiores, variando de 25 a 55 metros (Natrontec, 1998).

A porção Leste apresenta batimetria menos irregular e menos profunda, com valores situando-se entre 10 e 20 metros. Nas proximidades da usina a profundidade máxima é da ordem de 10 metros.

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). Estas cartas foram editadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação – DHN.

As cotas batimétricas foram acrescidas de 0,68 cm, 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. A partir desses dados, foi gerada uma grade batimétrica, vide figura 8, através de interpolações, onde para cada nó pertencente à malha foi calculada uma profundidade.

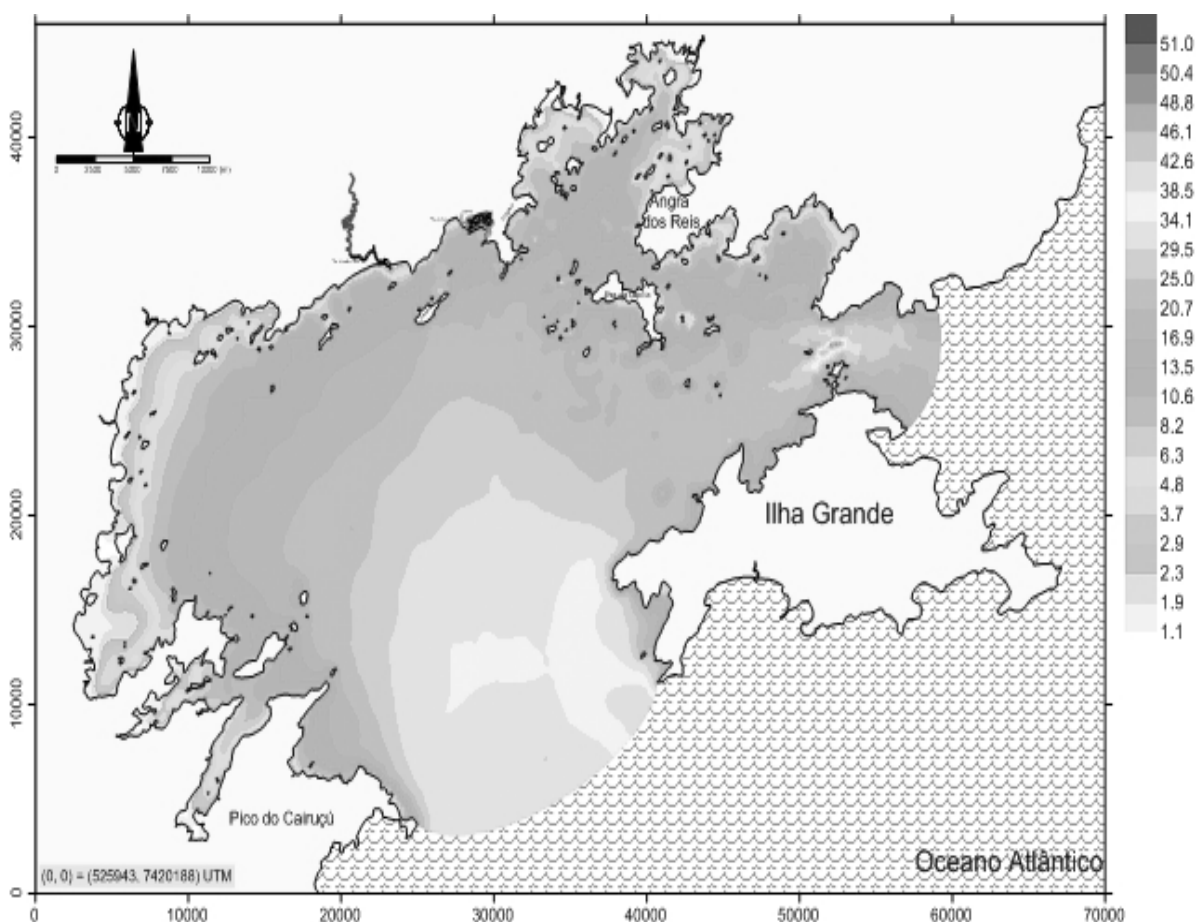


Figura 8 – Batimetria utilizada na modelagem.

Fonte: Software Surfer.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS SEDIMENTOS DE FUNDO

Estudos sobre a caracterização dos sedimentos de superfície de fundo da Baía da Ilha Grande foram realizados por (Mahique & Furtado, 1989). No referido trabalho, foram coletadas 153 amostras de sedimentos de fundo e da plataforma continental adjacente, onde foram evidenciados três grupos distintos de populações que caracterizam os sedimentos da BIG:

- as areias finas da porção oeste e da plataforma continental;
- as areias médias e grossas da porção leste;
- os pelitos do canal central e das áreas abrigadas.

Segundo os autores, as areias finas predominam em quase toda a porção oeste, estendendo-se para a plataforma continental. No centro da porção oeste, pequenas áreas de sedimentos mais grosseiros (areias finas e médias).

Segundo Brugnara (1977), nos sacos de Piraquara de Fora e Piraquara de Dentro o sedimento é predominantemente arenoso, o mesmo ocorrendo nos trechos de maior circulação, entre a Ilha Comprida de Fora e a costa sul da Ilha da Gipóia e, ao largo de Mambucaba e Itaorna.

Na direção ao canal central os sedimentos passam gradativamente a termos mais finos, predominando nesta área os siltes finos e muito finos. Já a porção leste é toda coberta por areias médias e grossas, que constituem os sedimentos mais grosseiros da baía. Esses sedimentos estendem-se para a plataforma continental, até a isóbata de 50 metros.

4.5 VENTO

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 DHN (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.

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.

Utilizaram-se estações meteorológicas na ilhota Pedra Pelada (estação M01 - 23° 03' 11,5" S e 44° 25' 14,2" W), Pedra Branca de Araraquara (estação M02 - 23° 04' 34,4" S e 44° 33' 23,6" W) e a Ilha dos Ganchos (estação M03 - 23° 10' 25,8" S e 44° 38' 03,7" W). Nas estações operadas na Pedra Pelada e na Pedra Branca foram monitoradas as variáveis vento, umidade relativa e temperatura do ar entre 24/02/2004 e 10/03/2004, enquanto na estação da Ilha dos Ganchos foram monitoradas as variáveis vento e temperatura do ar entre 14/02/2004 e 10/03/2004. As estações M01 e M02 operaram com intervalo de aquisição de 10 minutos, enquanto a estação M03 operou com intervalo de aquisição de 15 minutos.

Os ventos mais frequentes observados na Pedra Pelada são provenientes de NNE e de SSE. A essas direções também estão associadas os ventos mais intensos, na classe de 5-8 m/s. Os ventos presentes na classe 3-5 m/s são também originados desses setores. Os ventos mais frequentes observados na Pedra Branca de Araraquara são provenientes de SE e de SSE. A essas direções também estão associadas os ventos mais intensos, na classe de 5-8 m/s. Os ventos presentes na classe 3-5 m/s são também originados desses setores. Os ventos mais frequentes observados na Ilha dos Ganchos são provenientes de W e de SSW. A essas direções também estão associados, com frequência significativa, os ventos das classes 1.5-3 e 3-5 m/s. Os ventos mais intensos, presentes na classe 5-8 m/s são originados em SE, SW e E.

Assim, o modelo foi alimentado apenas com dados característicos do regime predominante. Na figura 9 é mostrado onde, no Sisbahia, são colocados esses dados.

Título: _C1. Modelo Angra 1,2 e 3 com Molhe de 170m.

Estado: Rodou sem Erros

Parâmetros | **Fronteiras** | **Infiltração & Viscosidade** | **Variáveis Meteorológicas** | **Condições Iniciais** | **Observações** | **Resultados**

Vento | **Evaporação** | **Precipitação**

Modo no tempo e no espaço: Variável e Variado em N estações

Distância Mínima: 0.001 | Potência: 2.0

Est.	Coordenada X	Coordenada Y
Met0104	31721.540	34930.710
Met0204	17786.510	32430.100
Met0304	9789.810	21646.130

Tipo de Direção do Vento: Azimute (AngVento_X)

Intervalo de Tempo (seg.): 600.00

Tempo	Intensidade	Direção
2400.0000	1.5750	15.0000
3000.0000	2.0049	11.0222
3600.0000	2.4276	7.0000
4200.0000	2.4275	6.3556
4800.0000	2.2136	10.8889
5400.0000	1.8214	15.2000
6000.0000	1.1555	14.6444
6600.0000	0.6596	8.2111
7200.0000	0.3397	14.6000
7800.0000	0.1971	74.1889
8400.0000	0.2800	8.5000
9000.0000	0.4907	-65.7000
9600.0000	0.8252	-49.5889
10200.0000	0.8944	-54.5556
10800.0000	0.9532	-61.1000
11400.0000	1.2258	-53.1556
12000.0000	1.4743	-45.2000
12600.0000	1.5949	-39.8000
13200.0000	1.4523	-40.3444
13800.0000	1.4355	-35.3111
14400.0000	1.3684	-34.1000
15000.0000	1.0423	-46.8111
15600.0000	0.9930	-53.8778

Executa... | Verificar | Visualizar Malha...

Busca: []

Início: 12:48 | Projeto: Baía Ilha Grande_PENO4841 | 04/01/2011 12:49

Figura 9 – Dados de entrada dos ventos usuais

Fonte : Software SisBahia.

5. METODOLOGIA

5.1 DOMÍNIO SIMULADO

5.1.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO DE TERRA

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).

No modelo digital da BIG estas são representadas pelos limites físicos entre o corpo d'água modelado e a região de terra adjacente com os pontos de afluxo (lançamento do efluente em Piraquara de Fora e Itaorna e a desembocadura do rio Mambucaba) e efluxo (captação de água da CNAAA), conforme mostra a Figura 3. Os valores de fluxos especificados para o contorno de terra são decompostos em componentes normais e tangenciais em substituição as direções x e y, respectivamente.

A condição típica para contornos de terra é a prescrição da componente do fluxo normal à fronteira em todos os seus pontos. Nos contornos de terra impermeáveis da BIG que não possuem contribuição externa de efluxo e afluxo, foram prescritos valores nulos do fluxo normal. Porém, nos nós posicionados na desembocadura do rio Mambucaba, nos locais de lançamento do efluente e captação de água da CNAAA, foi colocado em cada nó um fluxo que corresponde à vazão desses efluxos ou afluxos.

Foram prescritas descargas nodais por unidade de comprimento da fronteira de terra, com unidades em $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para os nós onde é realizado o lançamento de efluentes, captação de água da CNAAA e na desembocadura do Rio Mambucaba. Os valores prescritos são tais que as integrais das descargas nodais ao longo dos segmentos de contorno terrestre, que representam as seções transversais do rio e dos canais, devem ser iguais às vazões do rio e dos canais em m^3/s .

O efeito do atrito nos contornos fechados (terra) foi modelado modificando a tensão no fundo, através de uma condição de deslizamento. O deslizamento na fronteira de terra, pode assumir qualquer valor entre 0 e 1, deslizamento nulo significa paredes laterais totalmente rugosa, com velocidades nulas ao longo dos contornos fechados. No caso da BIG o valor de deslizamento foi 0,7. Este valor foi adotado em função das suas características físicas. Este valor também foi adotado em outras baías, como a Baía da Guanabara (Araújo, 1993).

5.1.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO ABERTO

Para um domínio de modelagem não há um limite físico que caracterize uma fronteira aberta. As condições de contorno nas fronteiras abertas devem ter a capacidade de trazer, para dentro do domínio modelado, as informações do escoamento na região externa a ele. 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).

Em escoamentos em corpos d'água costeiros, como a BIG, em que o principal forçante é a maré, foi especificado nos contornos abertos as oscilações da superfície livre em toda a extensão das duas fronteiras. Contudo, em qualquer ponto do encontro aberto que apresente situações de efluxo, deve-se especificar o fluxo tangencial ao longo do segmento e tomá-lo como igual a zero. O tratamento das fronteiras abertas é uma dificuldade nos modelos numéricos de circulação. Medições de maré e vazão nem sempre estão disponíveis para a região de estudo e, nos casos positivos, a extrapolação ou interpolação dos dados, podem introduzir erros na solução,

principalmente quando as fronteiras são muito extensas (Davies et al, 1997a, Davies et al, 1997b).

No domínio simulado, as fronteiras abertas se caracterizam pelo encontro de massas d'água. A primeira situa-se na parte oeste da BIG e a segunda localiza-se na parte leste, delimitando o encontro das águas da BIG com as águas da Baía de Sepetiba.

Há uma defasagem da onda de maré entre as duas fronteiras, a onda de maré chega primeiro na fronteira aberta 1 e depois na fronteira aberta 2, vide figura 10. As defasagens da maré foram estimadas em função da suposta direção de propagação da maré e profundidades locais, levando-se em conta a velocidade de propagação de ondas em águas rasas. Foi estimada para a fronteira 2 uma defasagem constante de 600 segundos, enquanto na fronteira 1 foi considerada uma diferença entre os pontos variando entre 0 e 90 segundos.

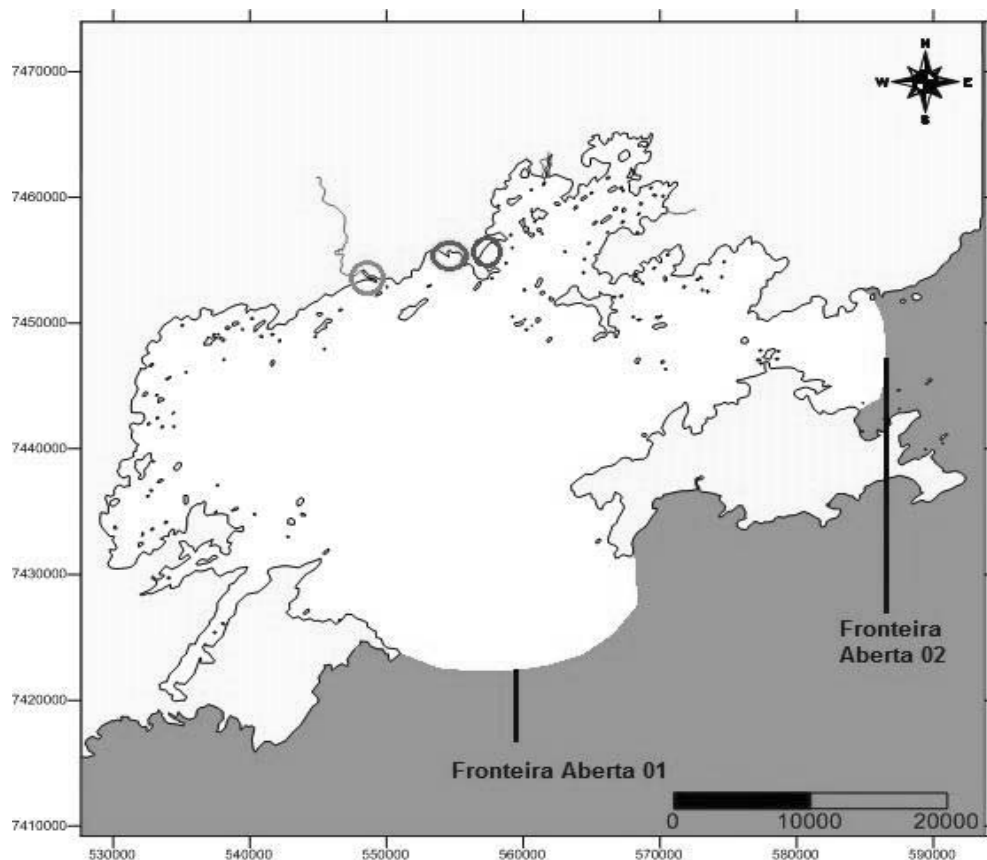


Figura 10 – Domínio simulado.

Fonte: Software Surfer, a partir de Soares (2010).

É possível notar, na figura 10, 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 proveniente do LOCA em Angra 3, nesta região também estão os pontos de captação de água para os condensadores de Angra 1, 2 e Angra 3. Há, em Piraquara, a região de descarte da água dos condensadores representado pelo círculo em azul. A região em verde corresponde ao rio Mambucaba.

As elevações de cada nó nas fronteiras abertas 1 e 2 foram determinadas através de medidas de nível da água realizadas continuamente em uma estação na Ilha Mingú, durante cerca de 20 dias ininterruptos. Como a estação foi posicionada dentro do domínio foi aplicada uma técnica de problema inverso. Para tanto, uma função de transferência foi utilizada de modo a prescrever os valores ao longo das fronteiras abertas que fossem resultantes dos valores medidos na estação. Assim, foram fornecidos ao modelo hidrodinâmico dados de entrada com intervalo de 10 minutos, resultantes dos valores promediados filtrados das medidas realizadas.

5.1.3 CONDIÇÃO INICIAL

Como condição inicial, foi imposta uma situação de máximas elevações em toda BIG com velocidades nulas, representando uma situação de preamar. Esta condição inicial é 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, a elevação do nível d’água e os componentes da velocidade diferentes de zero, serviram como condição inicial para as próximas rodadas, vide figura 11.

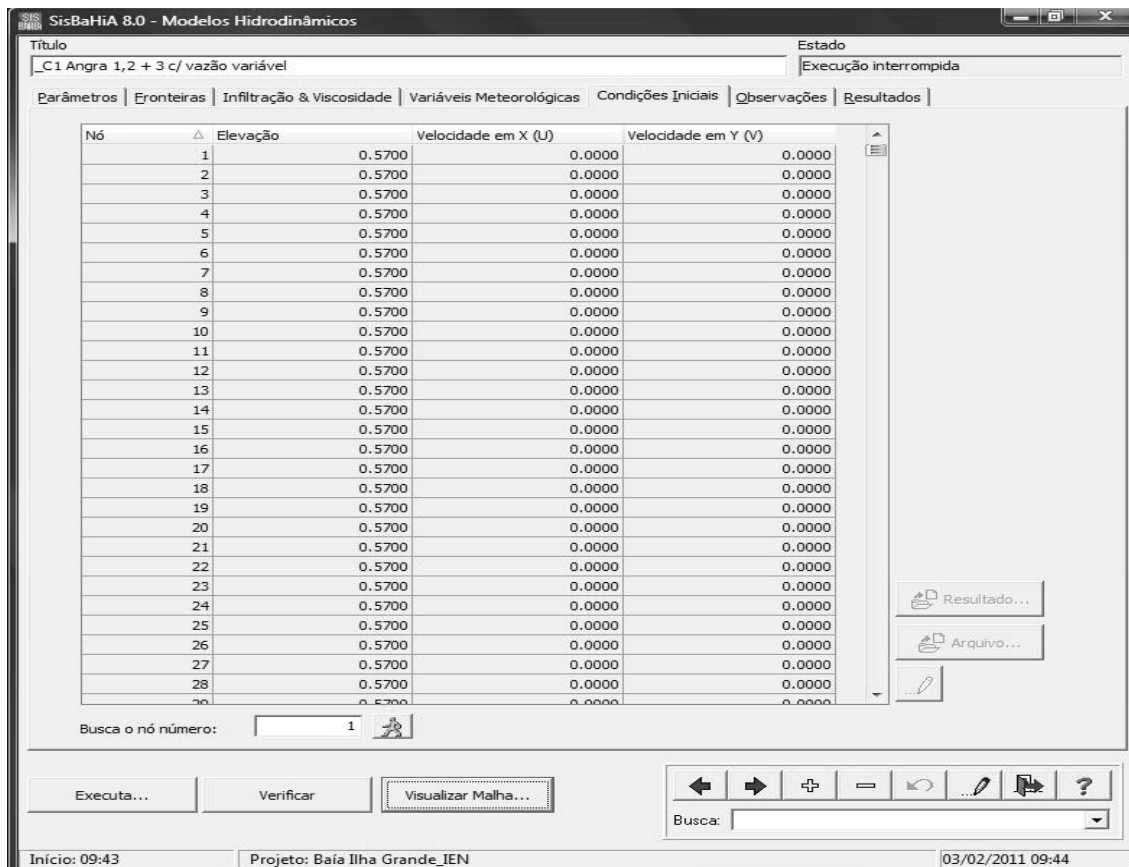


Figura 11 – Condições Iniciais.

Fonte: Software SisBahia.

5.1.4 GEOMETRIA DO DOMÍNIO SIMULADO

Na figura 12, encontra-se a geometria do corpo d'água que foi aproximada por 2.081 elementos finitos quadriláteros bi-quadráticos, num total de 9.297 nós na malha de elementos finitos. Próximo a área de lançamento foi realizado um refinamento da malha de elementos finitos.

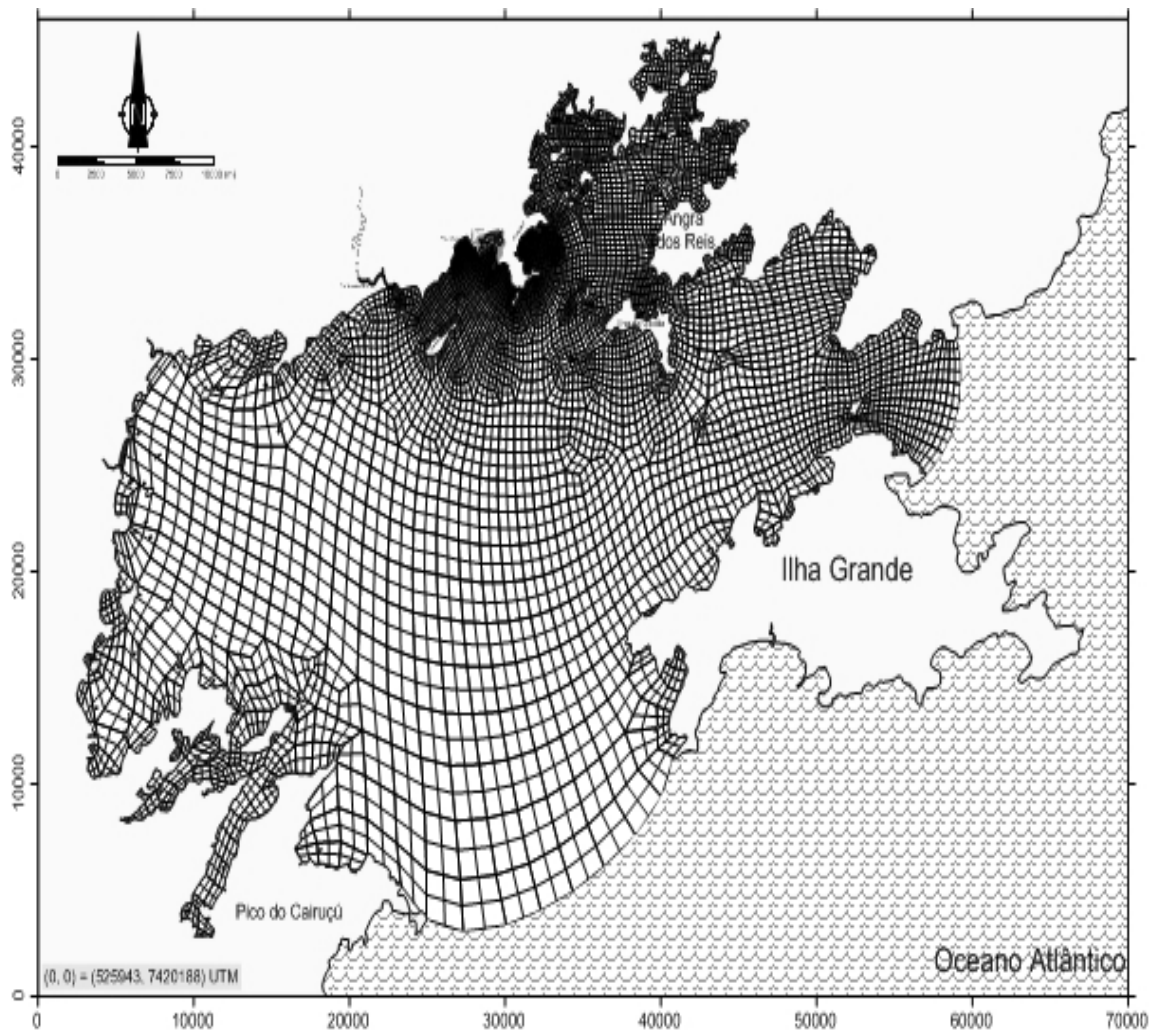


Figura 12 – Domínio da BIG discretizado.

Fonte: Software Argus One.

5.1.5 RUGOSIDADE DO FUNDO

As amplitudes da rugosidade equivalente de fundo ao longo da BIG consideradas pelo modelo foram definidas aplicando a classificação apresentada por Abbot & Basco (1989), para os sedimentos de fundo caracterizados por Mahiques & Furtado (1989). Desta forma, o substrato da BIG, foi classificado conforme disposto na tabela 4.

Tabela 4 – Amplitudes da rugosidade equivalente de fundo.

Tipo de sedimento	Amplitude da rugosidade equivalente do fundo (m)	Localização
Pelitos	0,01	Canal central e áreas abrigadas (zonas mais internas das sub-baias e enseadas)
Pelitos à Areia fina	0,02	Porção Oeste da BIG e na Plataforma Continental
Areia fina	0,03	Porção Leste da BIG
Areia média	0,04	Área central da BIG
Areia média à grossa	0,05	Extremo Leste da BIG

Fonte: Franklin (2001).

Se as amplitudes forem maiores do que o ideal, as alturas de maré calculadas pelo modelo serão menores do que as observadas no campo. Paralelamente, se as amplitudes forem menores do que o ideal, as alturas de maré calculadas pelo modelo deverão ser maiores que as medidas. A razão disto está na quantidade de energia dissipada.

Observa-se na figura 13 a distribuição da amplitude da rugosidade equivalente de fundo na área modelada.

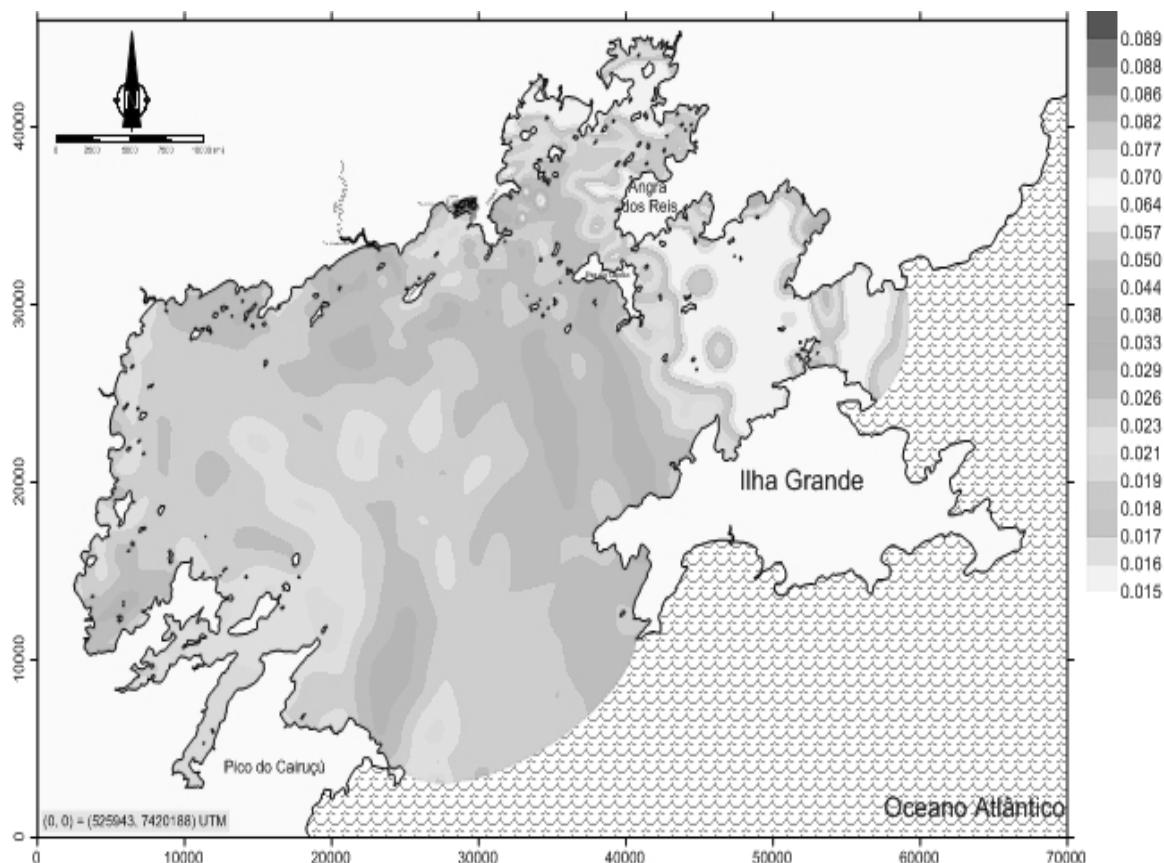


Figura 13 – Distribuição de amplitude da rugosidade.

Fonte: Software Surfer.

5.2 RADIONUCLÍDEOS SELECIONADOS PARA SIMULAÇÃO

Do inventário de radioatividade do refrigerante gerado pelo reator PWR de Angra 2, optou-se por simular os radionuclídeos, representando ambos os produtos de fissão e corrosão, que apresentassem altas concentrações e altas taxas de assimilação e, assim, com maior risco radiológico. Os radionuclídeos escolhidos que se enquadram nestes critérios foram, o ^{137}Cs e o ^{60}Co , respectivamente. (FSAR, 1999).

Além disso, outro radionuclídeo foi escolhido como o ^3H , considerando o comportamento conservativo do mesmo e suas características particulares na transferência dentro da cadeia alimentar aquática.

5.2.1 TRÍCIO

Em presença de água, o ^3H troca rapidamente com os íons de hidrogênio para formar água tritiada na forma líquida ou de vapor. É um isótopo radioativo com meia-vida de 12,262 anos, decai emitindo radiação β^- , transmutando em hélio.

A partícula beta emitida pelo trício 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 μm no tecido. Isso significa que o trício 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].

Comparando o comportamento da molécula de água tritiada com o da molécula de água normal, verifica-se que a molécula de água tritiada apresenta comportamento diferente em relação aos processos físicos, tais como evaporação e condensação, devido a sua diferença de massa. No entanto, essa diferença é tão pequena que para efeitos práticos ela se torna insignificante. Desta maneira, o trício se torna um traçador ideal para estudos do movimento de massas d'água no ambiente.

O trício também troca facilmente com o hidrogênio comum da água, sendo assim assimilado em organismos vivos, formando o trício organicamente ligado (OBT – sigla em inglês). Tais moléculas contendo trício 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 trício orgânico.

5.2.2 CÉSIO

O céσιο (^{137}Cs – meia vida de 30 anos), é um metal alcalino que existe em solução aquosa como uma espécie relativamente simples, íons de céσιο hidratado. O céσιο ocorre predominantemente dissolvido em água do mar, a solubilidade do céσιο na água marinha é maior que na água doce. Assim, na água do mar, essa concentração varia entre 0,1 e 0,5 ppm – partes por milhão – e na água de rios, entre 4×10^{-6} e 7×10^{-4} ppm. (Benss, 1988 & Weast, 1970).

Devido ao seu comportamento, este radionuclídeo tem sido extensivamente utilizado como traçador de circulação oceânica, além de ser usado para avaliar modelos que envolvam estudos de processos físicos tais como ventilação de mares profundos (Nyffeler, F. et AL., 1996).

O céσιο-137 decai por partícula beta, ou seja β^- , tendo energias de 0,51 Mev (94%) e 1,18 Mev (6%). Estudos a respeito da adsorção e remoção de radionuclídeos por sedimentos concluem, para o céσιο, um coeficiente de distribuição de 10^2 (baixo K_d), refletindo a tendência deste elemento em permanecer na forma iônica, dissolvido na água do mar. A remoção do céσιο da coluna d'água por deposição em sedimento, foi estimada em 3 a 8%. (Biotec, 1972).

5.2.3 COBALTO

O cobalto (^{60}Co – meia vida de 5,27 anos), é um metal de transição de cor cinza azulada encontrado de forma estável na natureza, tem características parecidas com a do ferro, podendo, inclusive, ser magnetizado. O radionuclídeo Cobalto-60 surge como produto da operação de reatores nucleares, quando materiais estruturais, como o aço, são expostos à radiação.

O cobalto-60 decai por desintegração beta (β^-) num isótopo estável (^{60}Ni). Emite partículas beta de 0,315 Mev (99,74%) e raios gama de 1,173 Mev

(100%) e 1,333 Mev (100%), possui solubilidade em água de 320 micrograma/100ml, uma grama de ^{60}Co contém aproximadamente 1,85 terabecquerels. Essa quantidade de cobalto-60 poderia irradiar uma pessoa com aproximadamente 0,5 Gray por minuto.

5.3 LOCA NO SISTEMA PRIMÁRIO POR GRANDE RUPTURA NA PERNA QUENTE

A elaboração deste *LOCA* teve como base de informação o trabalho de Andrade & Sabundjian (2004) e o documento da Eletronuclear (FSAR, 2010) Rev. 11, Angra 2, no capítulo relativo à análise de acidentes. O acidente consiste basicamente na quebra total da perna quente, perda de refrigerante, do circuito 20 da Usina, a área considerada para a ruptura é de 4418 cm² que corresponde a 100% da área de escoamento da tubulação do circuito primário.

A diferença essencial entre a localização da ruptura na perna-quente ou na perna-fria é que na perna-quente, o fluxo de massa do núcleo não é revertido durante um *blowdown* (descarga de alívio). Isto leva a um fluxo de resfriamento contínuo no núcleo com o resultado que mesmo após o início do acidente, não é observado ebulição nucleada no núcleo. (FSAR, 2010).

Os acidentes do tipo *LBLOCA* são caracterizados por uma rápida depressurização do circuito primário a valores onde ocorre a atuação da injeção de água pelos acumuladores e, logo em seguida, da injeção de segurança de baixa pressão. O lado secundário é requerido na remoção de calor residual. Os processos termo-hidráulicos inerentes à fenomenologia do acidente tais como a vaporização da perna quente com consequência vaporização do núcleo causando uma má distribuição de vazão no seu interior, podem levar a uma redução do nível de líquido provocando o descobrimento do núcleo num intervalo de tempo limitado.

A figura 14 apresenta o local da quebra para esse tipo de acidente, *LBLOCA*.

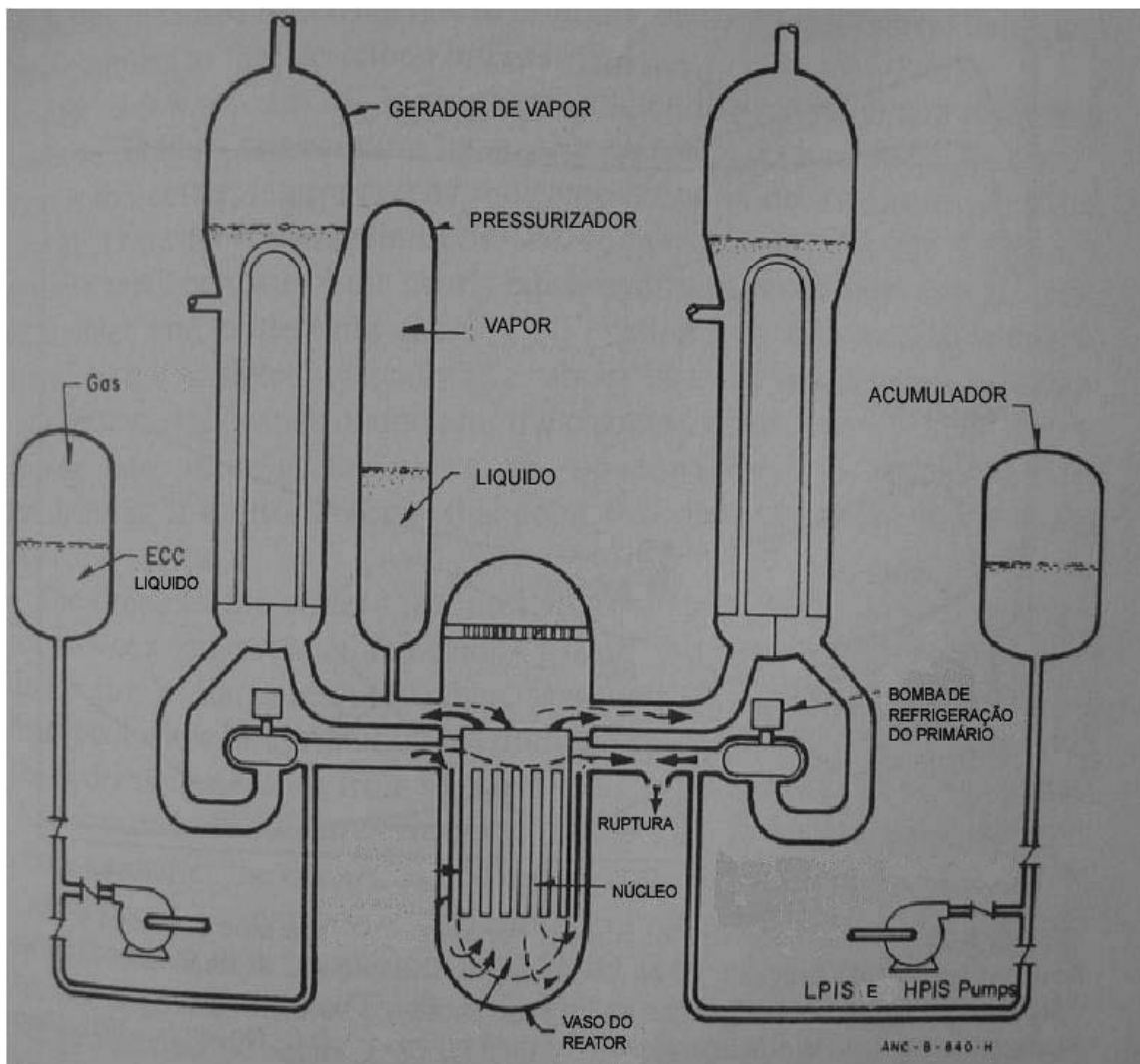


Figura 14 – Local da ruptura no sistema primário – LBLOCA.

Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Todreas & Kazimi (1990).

A potência do reator, para este acidente, foi considerada de 100%, a sequência de eventos ocorrida durante o *LBLOCA* pode ser vista na tabela 5.

Tabela 5 – Sequência de eventos para o LBLOCA na perna-quente

EVENTO	TEMPO(s)
Início da ruptura	0.0
Desligamento do reator, isolamento da turbina, perda de potência externa(EPM) e desligamento das bombas do primário	1.1
Resfriamento do lado secundário à taxa de 100 K/h	1.1
Critério de atuação do SREN atingido ($p_{RCS} < 110$ bar e $p_{cont} > 1,03$ bar)	9.2
Início da injeção pelos acumuladores	24.0
Início das bombas de injeção de segurança	40.0
Fim da despressurização	42.0
Início do recobrimento do núcleo	85.0
Pico de temperatura na perna quente	85.0
Pico de pressão na contenção	112.0
Término da simulação	250.0

Fonte: Andrade & Sabundjian (2004).

Segundo os resultados obtidos por Andrade & Sabundjian (2004), através do RELAP5/MOD.3.2.2G, observa-se que devido ao isolamento da turbina, a pressão no lado secundário sobe bruscamente atingindo as condições para resfriamento à taxa de 100 K/h, quando então a pressão

decrece monotonicamente, a pressão no pressurizador cai à pressão do sistema em torno de 50s.

Devido à despressurização rápida do sistema primário, início do acidente, há uma brusca descarga de água que vai diretamente para a contenção. Com a rápida despressurização que ocorre no sistema primário, a pressão de todo o resto do sistema tende a entrar em equilíbrio com a pressão da contenção.

O valor máximo de temperatura atingido na vareta mais quente é de 570 °C, sendo que o pico de temperatura no revestimento fica bem inferior ao limite de projeto que é de 1200 °C. A pressão na contenção tem seu valor máximo atingido de aproximadamente 2,4 bar, que corresponde um valor abaixo do valor máximo apresentado no FSAR (> 3 bar).

Durante a despressurização, que ocorre nos primeiros 50 segundos, o núcleo fica totalmente descoberto, mas por um pequeno intervalo de tempo. O nível se recupera tendendo ao seu valor normal aos 250 segundos de acidente, a partir dos 80 s inicia-se a reinundação do núcleo do reator, devido à injeção de água pelos acumuladores, com isso o sistema recupera o seu inventário de massa, tendendo a seu valor nominal aos 250 segundos de acidente. Isto mostra a eficiência do SREN durante o acidente evitando a fusão do núcleo.

Porém o inventário do primário, vazado instantaneamente para a contenção, ou seja 431 m³, não poderia ser retido na contenção de Angra 3 e escoaria pelo circuito de coleta de águas pluviais sendo liberado no canal de lançamento de efluentes em Itaorna, durante uma hora, com uma vazão de 0,12 m³/s (431 m³ / 3600). A concentração de atividade de cada radionuclídeo no refrigerante liberado, no cenário simulado nesse estudo, foi apresentada na tabela 1 do capítulo 3 tópico 3.3.

6. RESULTADOS

6.1 CENÁRIO SIMULADO

O cenário proposto para esta dissertação que melhor representava o momento do acidente foi ter em condição de efluxo a captação de 194 m³/s, representando o funcionamento a plena potência de Angra 1 (40m³/s), Angra 2 (77m³/s) e mais 77m³/s para Angra 3. Em condição de afluxo temos as descarga de 117m³/s em Piraquara de Fora), das usinas Angra 1 e Angra 2, e 77m³/s em Itaorna da usina Angra 3 e a vazão média do rio Mambucaba de 27m³/s.

A partir do momento do acidente foi inserida uma variação progressiva das vazões de captação e descarga de Angra 3 ,indo do seu valor máximo até um valor constante próximo a zero a partir do 6º dia de simulação. As captções de Angra 1 e 2 e a descarga em Piraquara de Fora continuaram inalteradas.

6.2 SIMULAÇÃO DO MODELO HIDRODINÂMICO

Como a modelagem realizada resulta em valores promediados na vertical, ou seja, 2DH, ao se mencionar “correntes” ou “circulação média na BIG”, subentende-se que se refere a valores promediados na vertical, por conseguinte, fica definido o que se entende por correntes 2DH ou circulação 2DH.

Para ilustrar a circulação 2DH resultante para o cenário proposto, são apresentados os campos de velocidade e direção de correntes obtidos para instantes de maior velocidade no ciclo de maré. Os instantes selecionados representam as situações de maré enchente e vazante, vide figura 16 a figura 23, ao longo de vinte dias que é o tempo necessário para um ciclo completo da maré de sizigia e quadratura, vide figura 15.

O passo de tempo utilizado no modelo hidrodinâmico 2DH foi de 30 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. Foram simulados 16 dias, 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.

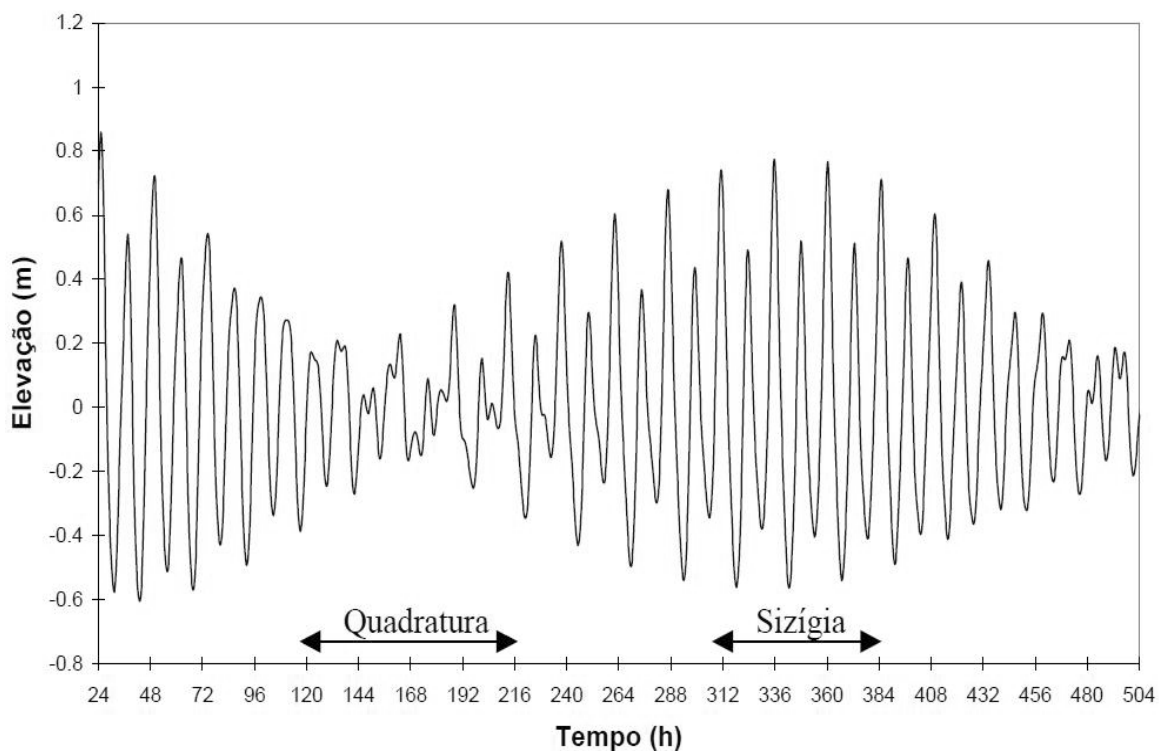


Figura 15 – Curva de maré utilizada na simulação do cenário proposto, gerada com as constantes harmônicas determinadas com base nas medidas obtidas na estação maregráfica.

Fonte: Software Grapher.

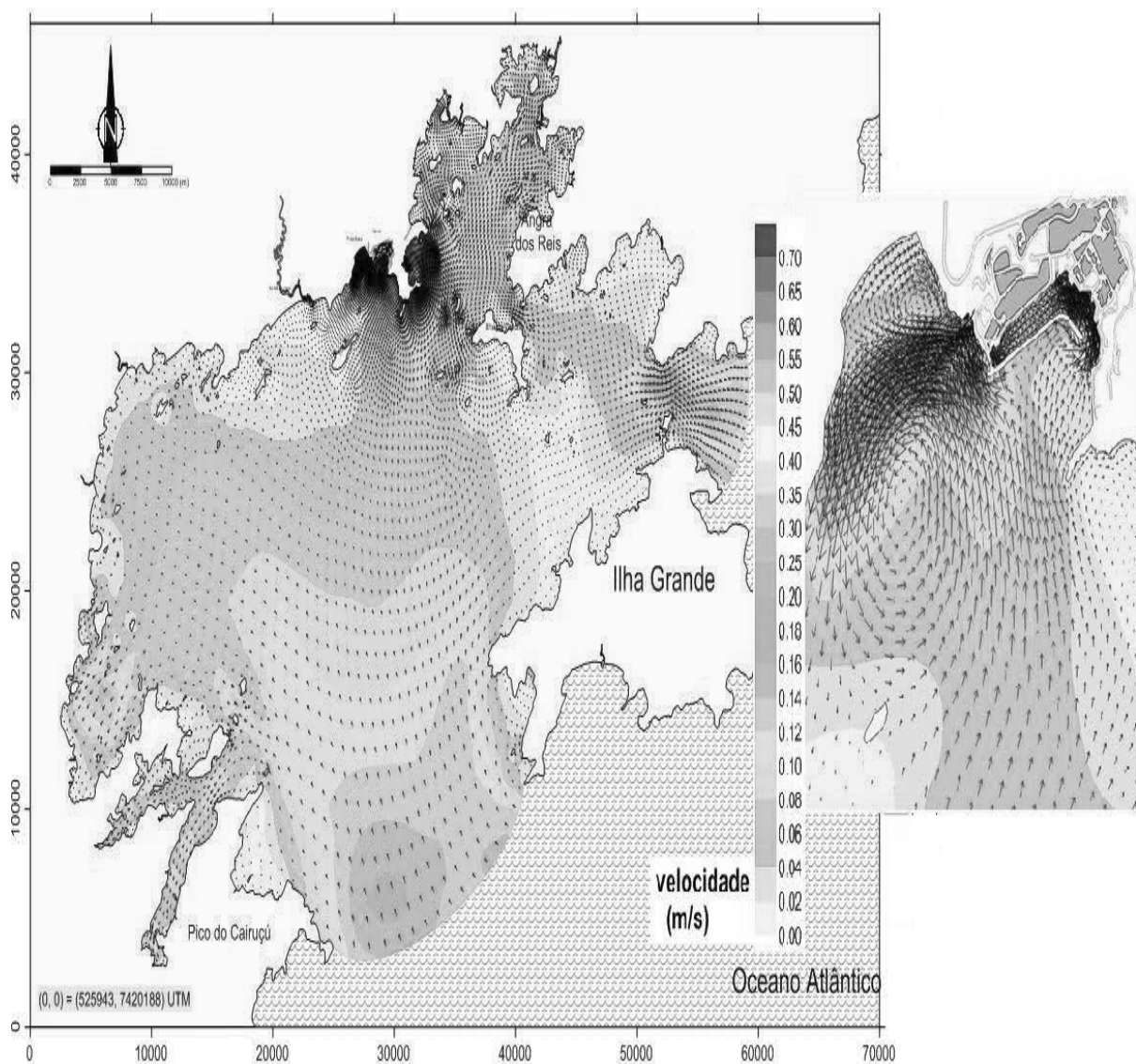


Figura 16 – Campo de velocidades para o instante de 22 horas de simulação. Período de meia maré enchente em situação de sizígia.

Fonte : Software Surfer.

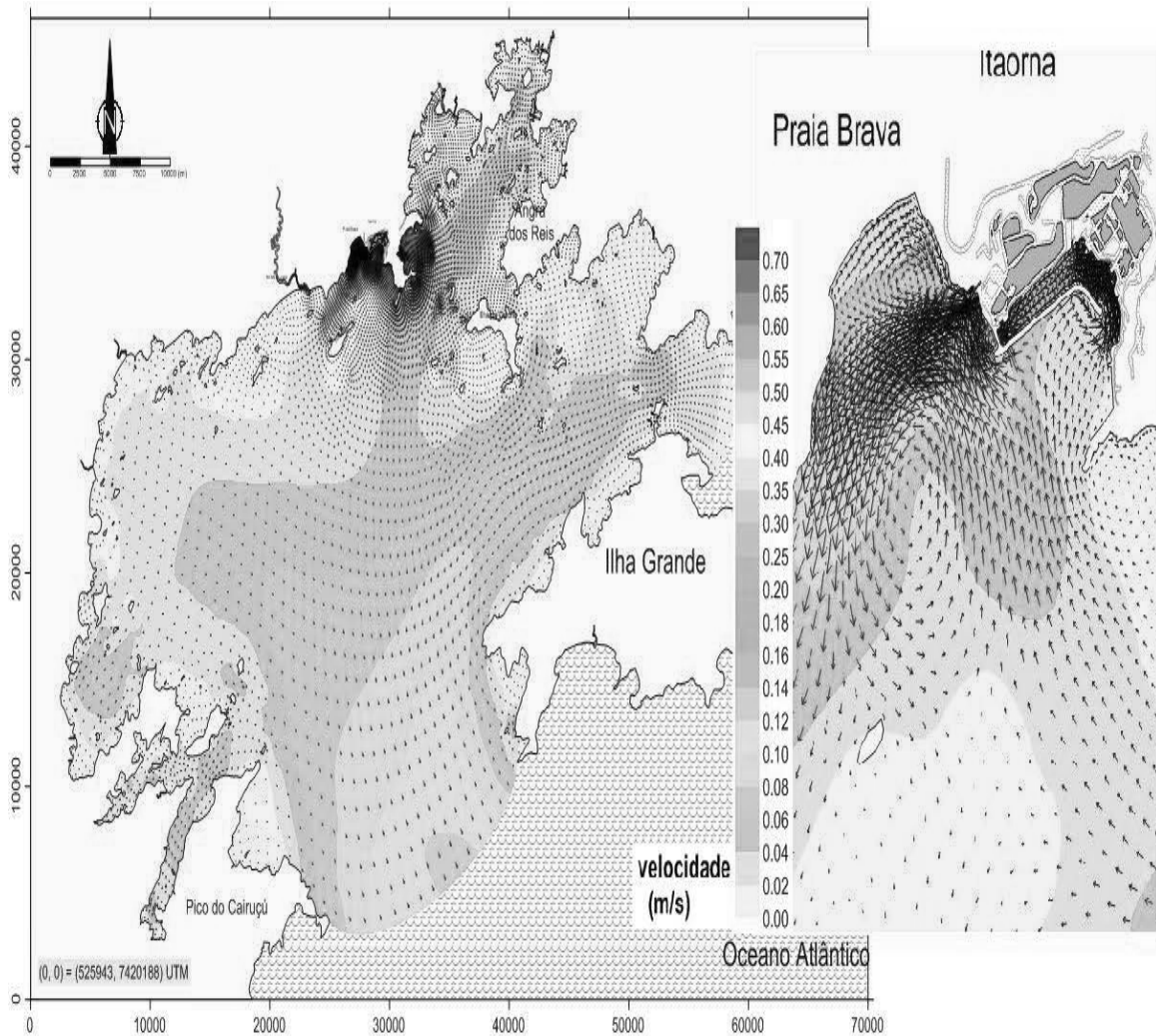


Figura 17 – Campo de velocidades para o instante de 30 horas de simulação. Período de meia maré vazante em situação de sizígia.

Fonte : Software Surfer.

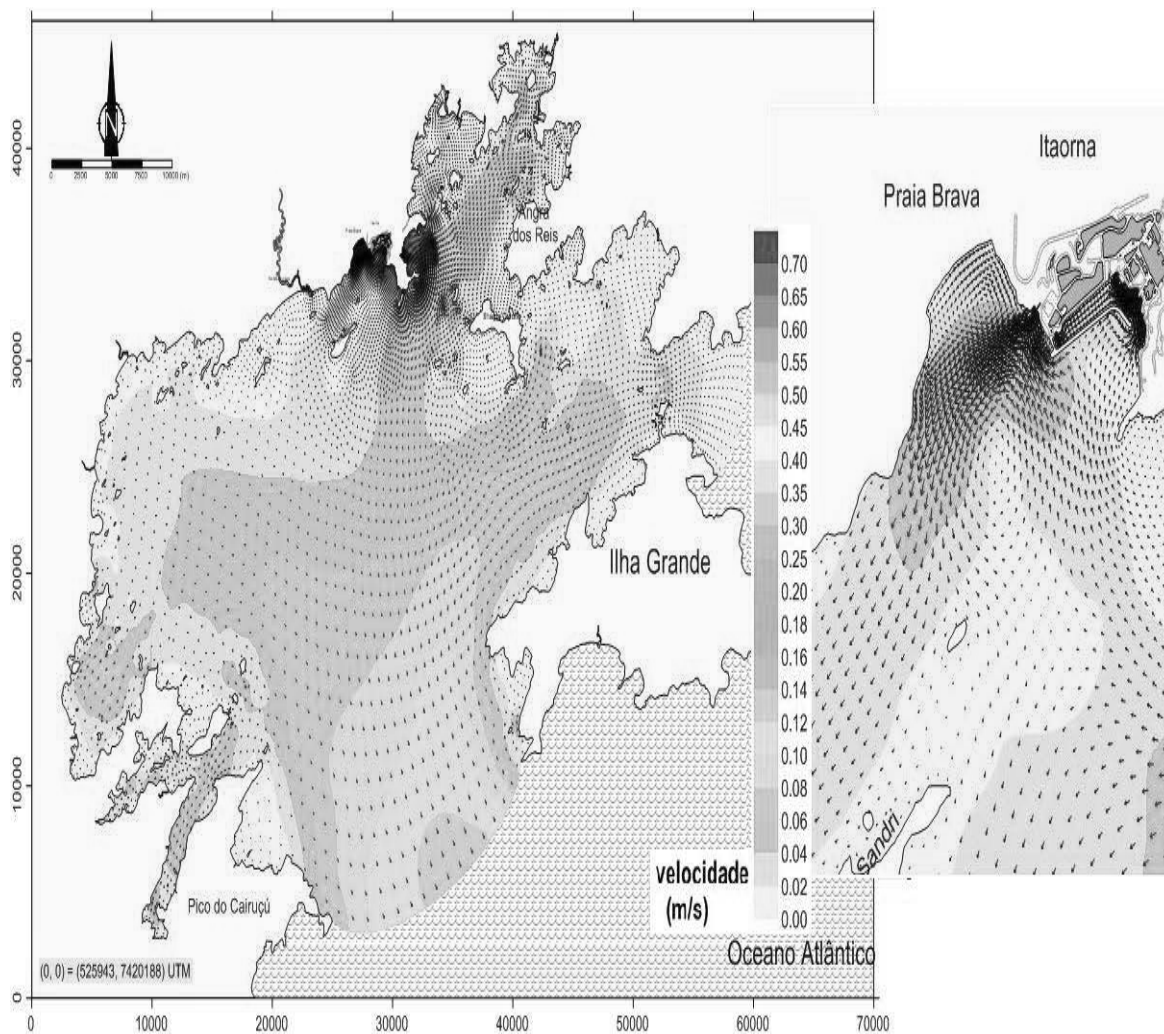


Figura 18 – Campo de velocidades para o instante de 79 horas de simulação. Período de meia maré vazante em situação de sizígia.

Fonte : Software Surfer.

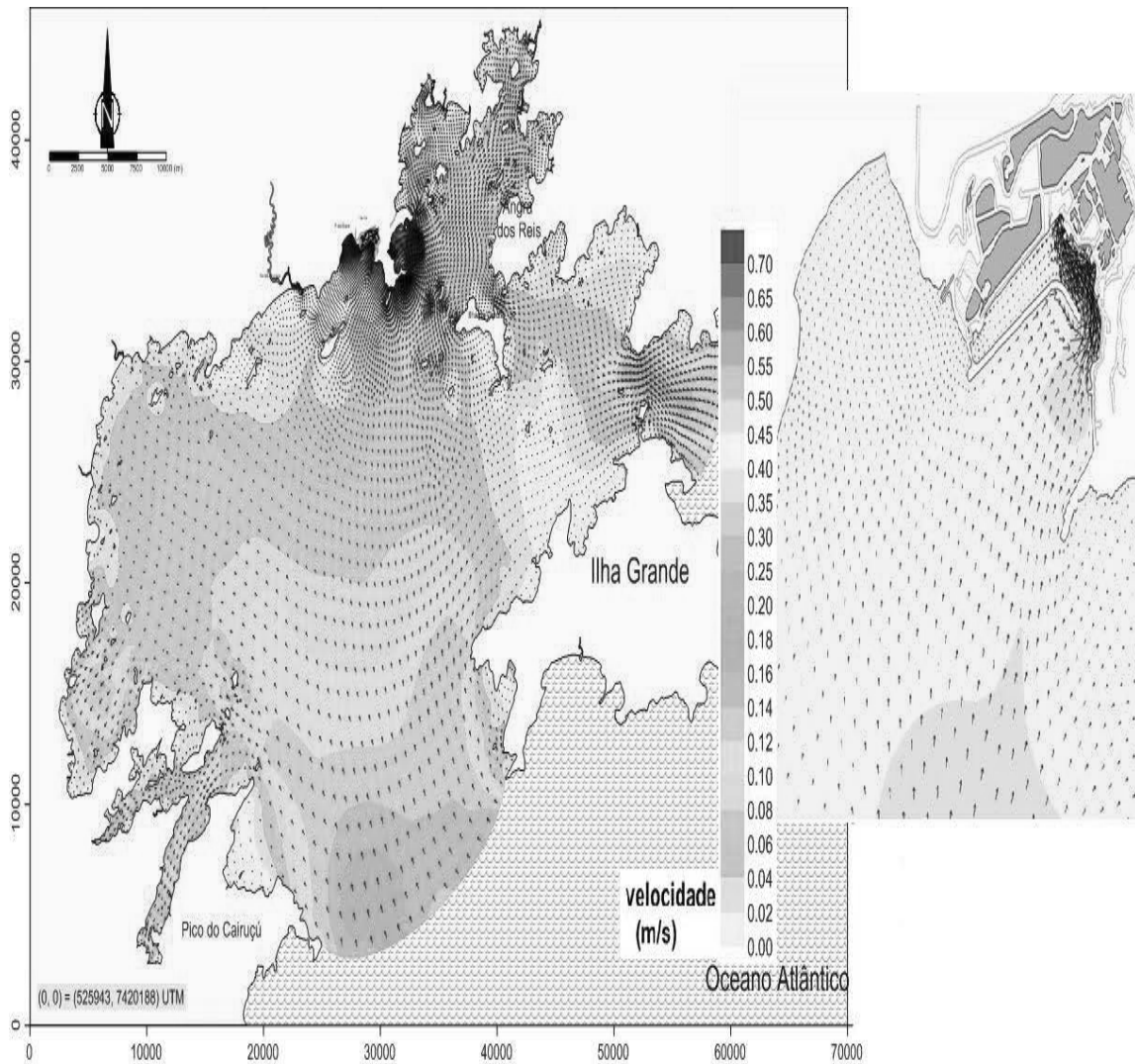


Figura 19 – Campo de velocidades para o instante de 170 horas de simulação. Período de meia maré enchente em situação de sizígia.

Fonte : Software Surfer.

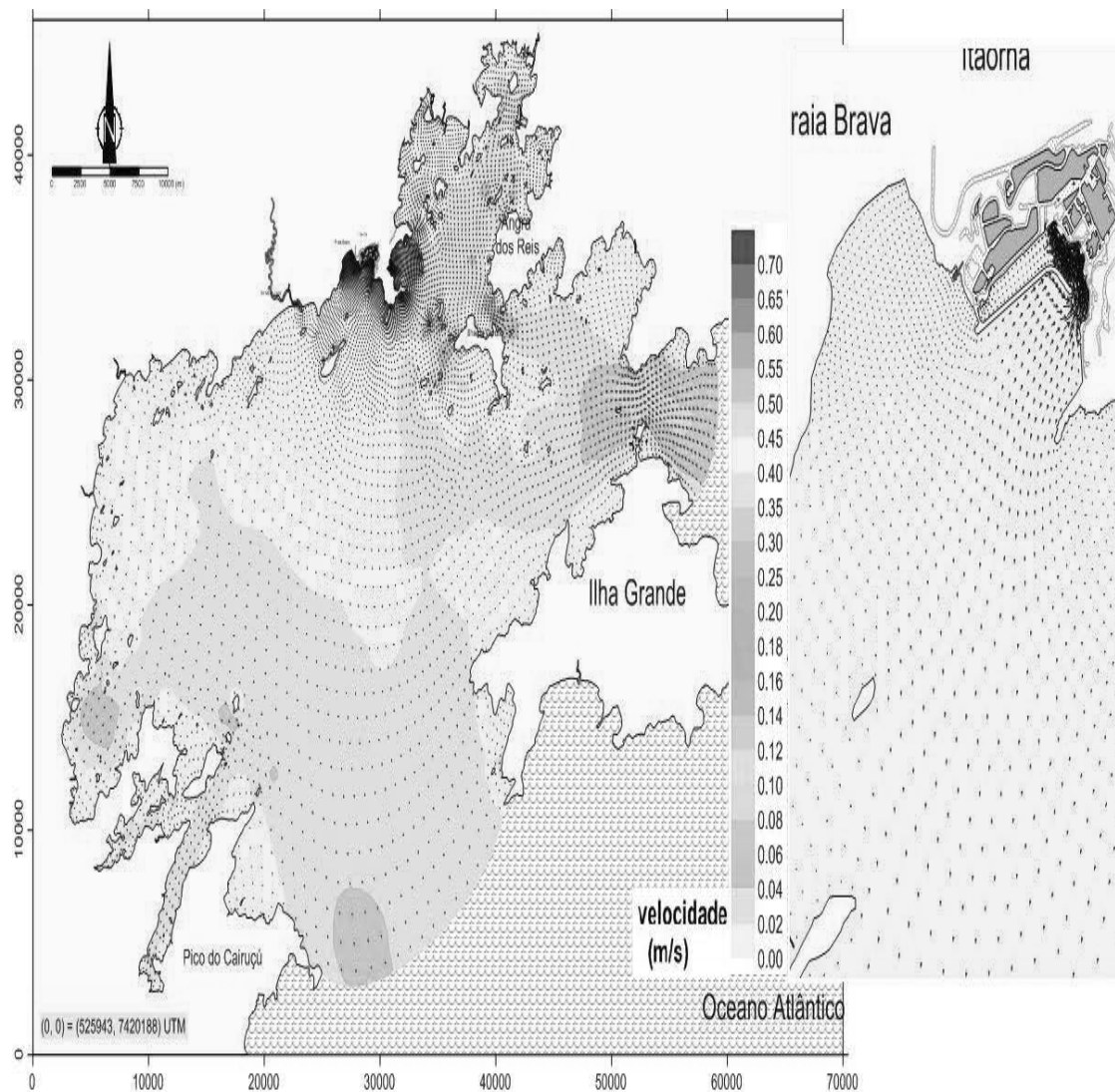


Figura 20 – Campo de velocidades para o instante de 280 horas de simulação. Período de meia maré enchente em situação de quadratura.

Fonte : Software Surfer.

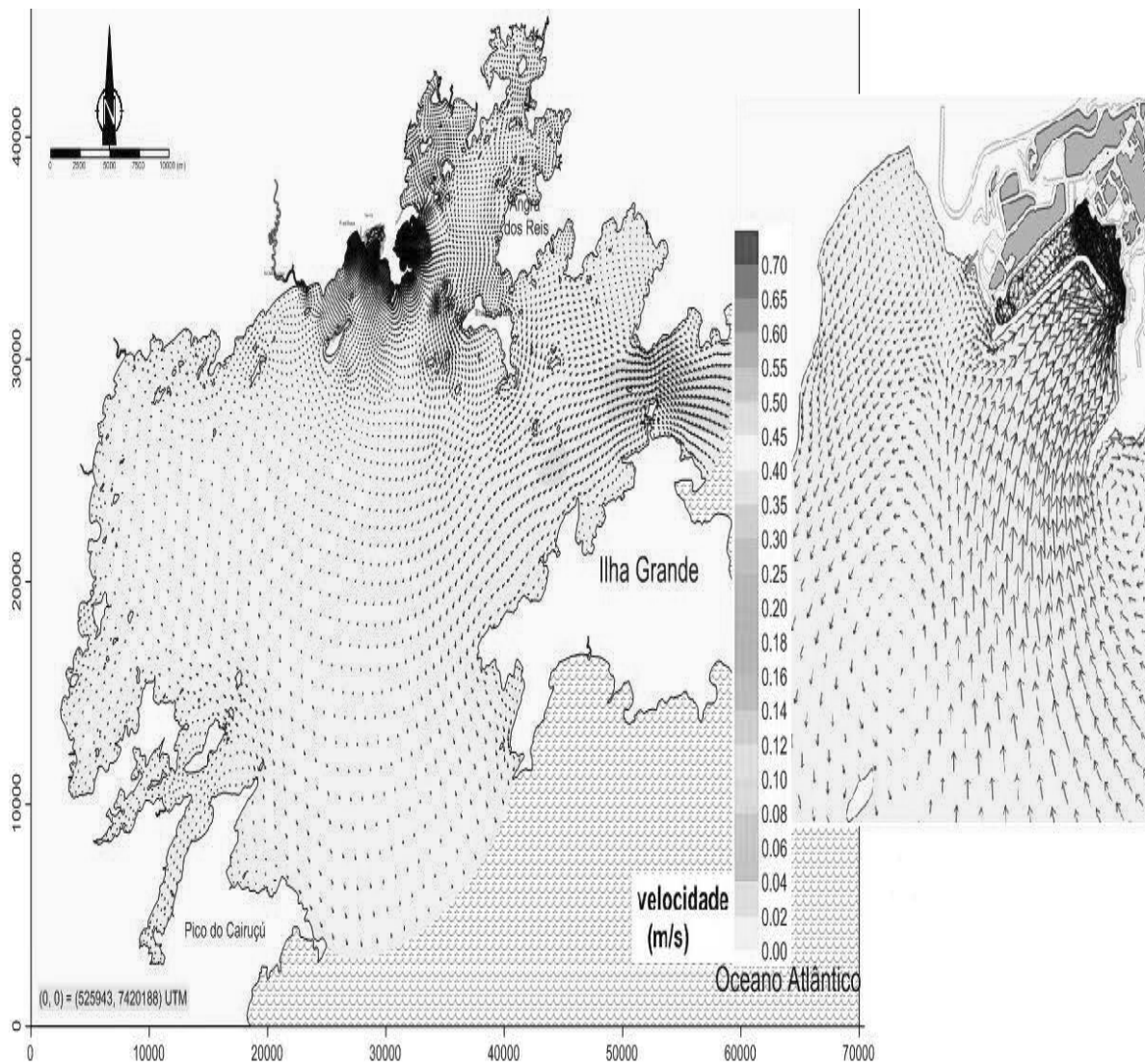


Figura 21 – Campo de velocidades para o instante de 289 horas de simulação. Período de meia maré vazante em situação de quadratura.

Fonte : Software Surfer.

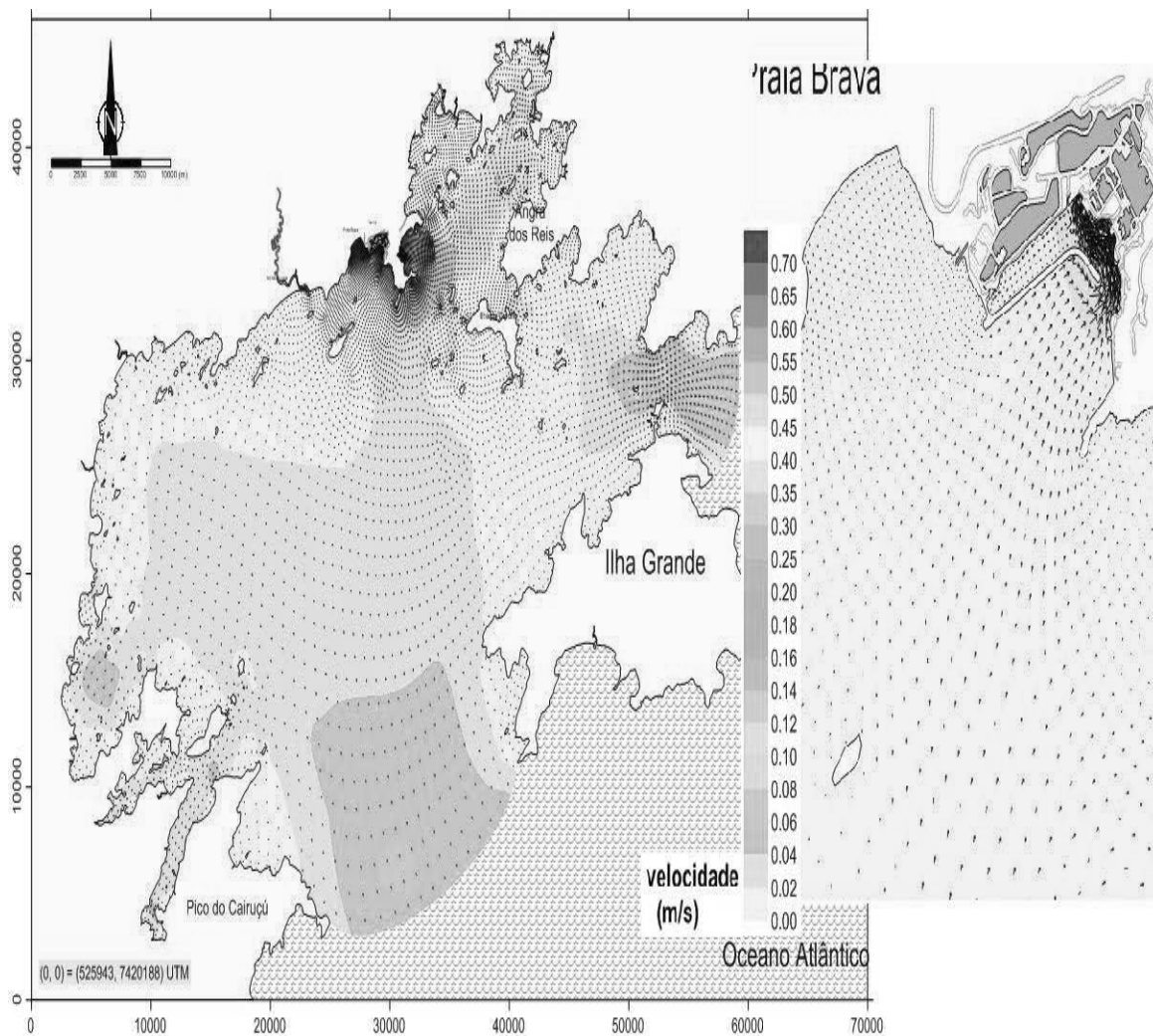


Figura 22 – Campo de velocidades para o instante de 333 horas de simulação. Período de meia maré enchente em situação de quadratura.

Fonte : Software Surfer.

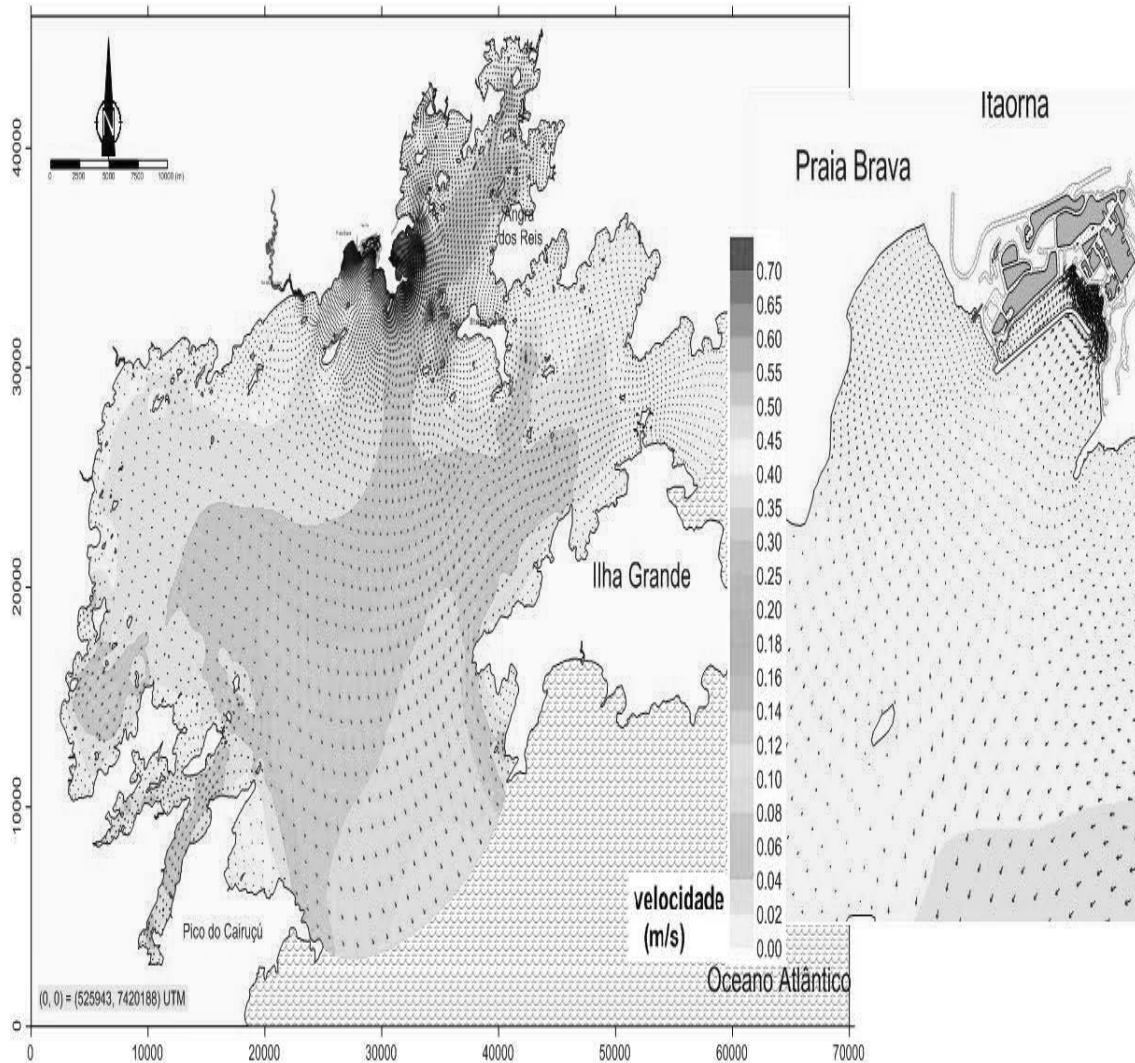


Figura 23 – Campo de velocidades para o instante de 340 horas de simulação. Período de meia maré vazante em situação de quadratura.

Fonte : Software Surfer.

A influência da captação e descarga das Usinas se expressa de forma bastante nítida em todo o estuário. Há 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. Esse vórtice se desfaz no instante de 79 horas, devido a diminuição gradual da descarga da usina Angra 3 que tem seus valores próximo de zero no instante de 170 horas.

Considerando a Baía da Ilha Grande como um todo, 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.

Além disso, o Saco de Piraquara de Fora que recebe a descarga de cerca de 120 m³/s forma um vórtice acentuado junto à linha de costa. No entanto as velocidades deste cinturão não são muito altas, oscilando em geral entre 14 e 20 cm/s e em algumas situações mais localizadas, alcançando valores entre 30 a 35 cm/s.

6.3 MODELO DE TRANSPORTE EULERIANO 2DH

O modelo de transporte advectivo-difusivo médio na vertical (Módulo Euleriano de transporte 2DH), pode ser utilizado com reações cinéticas de escalares dissolvidos ou partículas em suspensão na massa d'água. Pode simular processos de decaimento ou produção por reações cinéticas internas e processos de eliminação através da sedimentação.

Em geral, esse tipo de modelo é mais útil para problemas de grande escala, uma vez que está sujeito à mesma discretização espacial horizontal e o mesmo esquema para discretização temporal do modelo hidrodinâmico 2DH. As equações que regem este modelo se encontram na referência – *Referências Técnicas* – do apêndice F.

Faz-se necessário, para simular a dispersão de ³H, ¹³⁷Cs e ⁶⁰Co no módulo de transporte euleriano 2DH do SisBAHIA, a utilização dos resultados obtidos pelo modelo hidrodinâmico no cenário considerado. A caracterização do fenômeno de transporte só foi possível com a prescrição de adequadas

condições iniciais e de contorno das concentrações de ^3H , ^{137}Cs e ^{60}Co , além dos dados e parâmetros usados na simulação.

A condição inicial para a concentração de atividade foi prescrito como sendo zero. Esta condição impõe que, antes do lançamento do inventário do primário da unidade 3 da CNAAA, as águas pertencentes ao domínio de simulação, não apresentavam concentração de atividades dos radionuclídeos simulados.

Para as condições de contorno de terra, o fluxo de entrada de radionuclídeo no domínio ocorre através de três nós no contorno de terra no ponto de lançamento do efluente, enquanto os demais não recebem nenhum tipo de contribuição. Já para a condição de contorno aberto, esta condição representa a concentração na região de águas externas ao domínio, através do balanço do fluxo de entrada e saída. A condição de contorno na fronteira aberta é a prescrição de um valor limite de concentração que no caso do sistema BIG não foi considerada a existência de concentração de atividade dos radionuclídeos simulados na região contígua às fronteiras abertas 1 e 2.

O passo de tempo utilizado no modelo foi de 100 s, representando o melhor desempenho do computador. Os resultados espaciais e temporais obtidos pelo modelo foram escritos em intervalos de tempo de 1 hora, para melhor visualizar a distribuição de concentração de atividade.

Foram simulados até 180 dias de transporte na BIG a partir do primeiro dia após o LBLOCA, com o objetivo de acompanhar a evolução da mancha.

6.3.1 IMPLEMENTAÇÃO DO CENÁRIO DE TRANSPORTE

A diluição inicial pode ser obtida pela razão entre a vazão do receptor e a vazão do efluente proveniente da liberação do refrigerante ($77 \text{ m}^3/\text{s} / 0.12 \text{ m}^3/\text{s} = 641.6$). Assim, ao dividir as concentrações de atividade do efluente (inventário do primário) pelo fator de diluição inicial, são obtidas as concentrações iniciais de cada radionuclídeo considerado que representam a concentração máxima que pode ser atingida no domínio, mas que normalmente são muito inferiores devido à diluição causada pelo transporte. Para melhor representar os efeitos da advecção, difusão e dispersão turbulentas envolvidos no fenômeno de transporte, dividiu-se a concentração inicial em três nós, tal como mostrado na figura 24, sendo que para o nó central foi atribuída a metade e para cada nó lateral um quarto da concentração inicial.

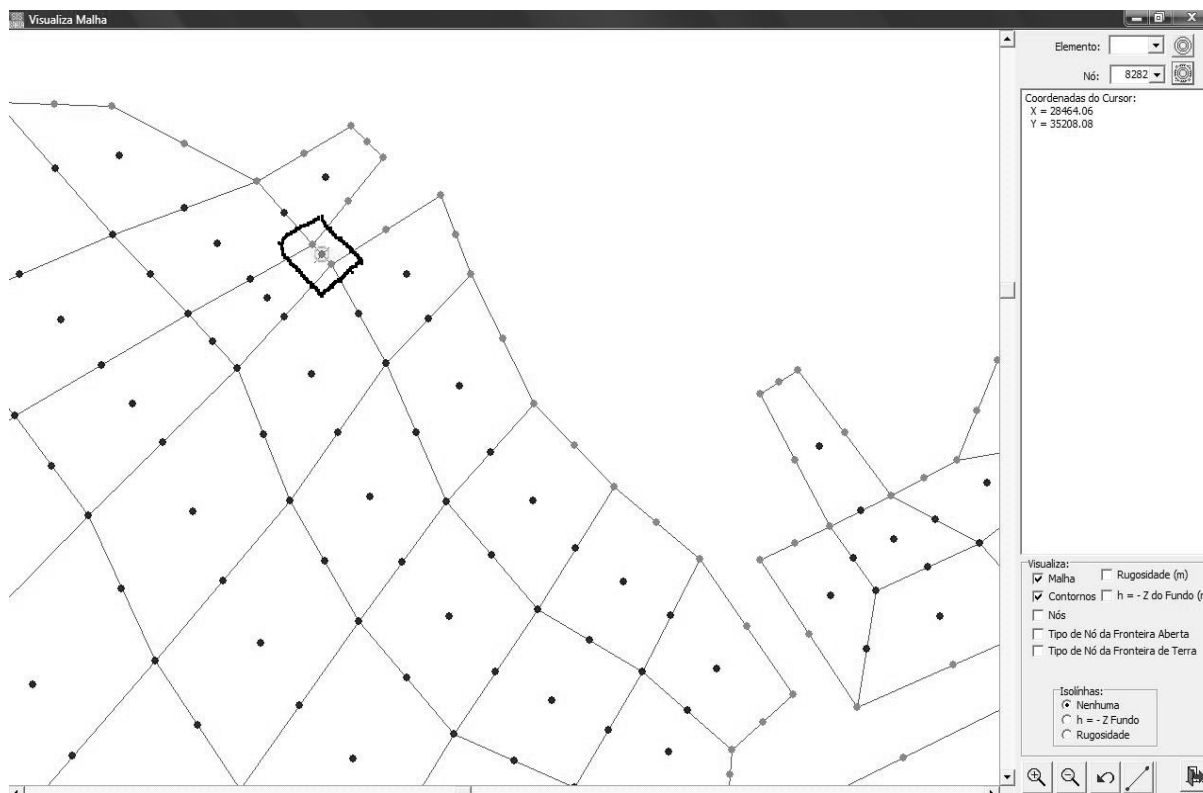


Figura 24 – Ponto de lançamento do efluente mostrado pela malha de discretização com o nó central 8282 e os nós laterais 8279 e 8419.

Fonte: Software SisBahia.

A opção de se trabalhar com índices de diluição da concentração inicial foi fornecer um entendimento claro da distribuição da concentração de atividade em todo o domínio de simulação. Para realização das simulações, o trício foi considerado conservativo, permanecendo na coluna d'água na forma de HTO e também assumindo que não há decaimento no período considerado. Esta última consideração também é válida para o césio e o cobalto, porém foram inseridas velocidades de sedimentação para esses radionuclídeos, sendo 0,05 mm/s para o cobalto e 0,005 mm/s para o césio. O cálculo da taxa de remoção por sedimentação foi apresentado no capítulo 2.

Para ilustrar os resultados obtidos foram escolhidos os instantes 22h, 30h, 54h, 79h, 103h, 170h e 333h, conforme mostrado através da sequência de figuras apresentado no tópico 6.4. A tabela 6 mostra os índices de diluição das concentrações adotados na confecção das escalas que constam nas figuras.

Tabela 6 – Valores adotados na confecção das figuras de distribuição da concentração de atividade do trício, cobalto e césio, com os índices de diluição associados.

Concentração de ^{60}Co (Bq/m ³)	Concentração de ^{137}Cs (Bq/m ³)	Concentração de ^3H (Bq/m ³)	Fonte %	Diluição (C^*/C_0)
0,25	15	5,00E+03	100	1
0,225	13,5	4,50E+03	90	0,9
0,2	12	4,00E+03	80	0,8
0,175	10,5	3,50E+03	70	0,7
0,15	9	3,00E+03	60	0,6
0,125	7,5	2,50E+03	50	0,5
0,1	6	2,00E+03	40	0,4
0,075	4,5	1,50E+03	30	0,3
0,05	3	1,00E+03	20	0,2
0,025	1,5	5,00E+02	10	0,1
0,0125	0,75	2,50E+02	5	0,05
0,005	0,3	1,00E+02	2	0,02
0,0025	0,15	5,00E+01	1	0,01

6.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.4.1 TRÍCIO

A concentração de atividade inicial no *Nó* central do lançamento é de $1,455 \times 10^7$ Bq/m³ e nos dois laterais $7,275 \times 10^6$ Bq/m³.

Apresentam-se nesta seção os resultados relevantes que mostram a dispersão na Baía da Ilha Grande da liberação do inventário do primário, tendo como análise o trício no período de 14 dias a partir do instante do acidente (LBLOCA).

Nas primeiras 22 horas após o acidente (situação de meia maré enchente de sizígia), podem ser observadas atividades de 1000 Bq/m³ e 500 Bq/m³ de trício junto a Praia Brava, devido a velocidades muito baixas no local que restringe a pluma. Porém, há uma redução dessa atividade nas proximidades da Ilha Sandri, onde se observam atividades que variam do ponto de lançamento, Itaorna – 250 Bq/m³ a Ilha – 50 Bq/m³, vide figura 25. Isto é ocasionado por velocidades altas no ponto de lançamento que se estendem nas proximidades desta Ilha.

No instante de 30 horas, em situação de meia maré vazante de sizígia, a pluma se apresenta mais espalhada, tendo sua maior concentração na Praia Brava, com atividade máxima de 1000 Bq/m³. Pode-se observar um aumento da atividade do trecho compreendido do ponto de lançamento – 500 Bq/m³ a 250 Bq/m³ na Ilha Sandri, vide figura 26, devido a um vórtice neste local que se desfaz a partir do instante de 79 horas.

A pluma no instante de 79 horas, em condição de meia maré vazante de sizígia, moveu-se predominantemente para o sul e sudoeste em direção a fronteira aberta 1 a um raio de aproximadamente 15 km da fonte. Esta aceleração do transporte se deve ao fato da pluma de trício ter encontrado correntes de maior velocidade em direção ao centro da Baía. Entretanto, as maiores concentrações de atividade, próximas a fonte, não ultrapassam o valor de 50 Bq/m³, vide figura 27.

Em 170 horas de simulação, em condição de meia maré enchente de sizígia, a pluma de trício alcança a Ilha da Gipóia, numa atividade de $0,5 \text{ Bq/m}^3$, e nas porções mais abrigadas da enseada de Parati. Neste instante, tem-se a vazão de captação e descarga da usina Angra 3 os valores próximos de zero, e as maiores concentrações de atividade o valor de 5 Bq/m^3 , vide figura 28.

Passados 333 horas de simulação, em situação de meia maré enchente de quadratura, observa-se um incremento acentuado na diluição da pluma que chega a entrar na Baía da Ribeira a nordeste numa concentração de atividade de $0,5 \text{ Bq/m}^3$, vide figura 29. Há o preenchimento de toda a parte oeste e também da fronteira aberta 1, a pluma se estabiliza no instante de 340 horas em situação de meia maré vazante de quadratura.

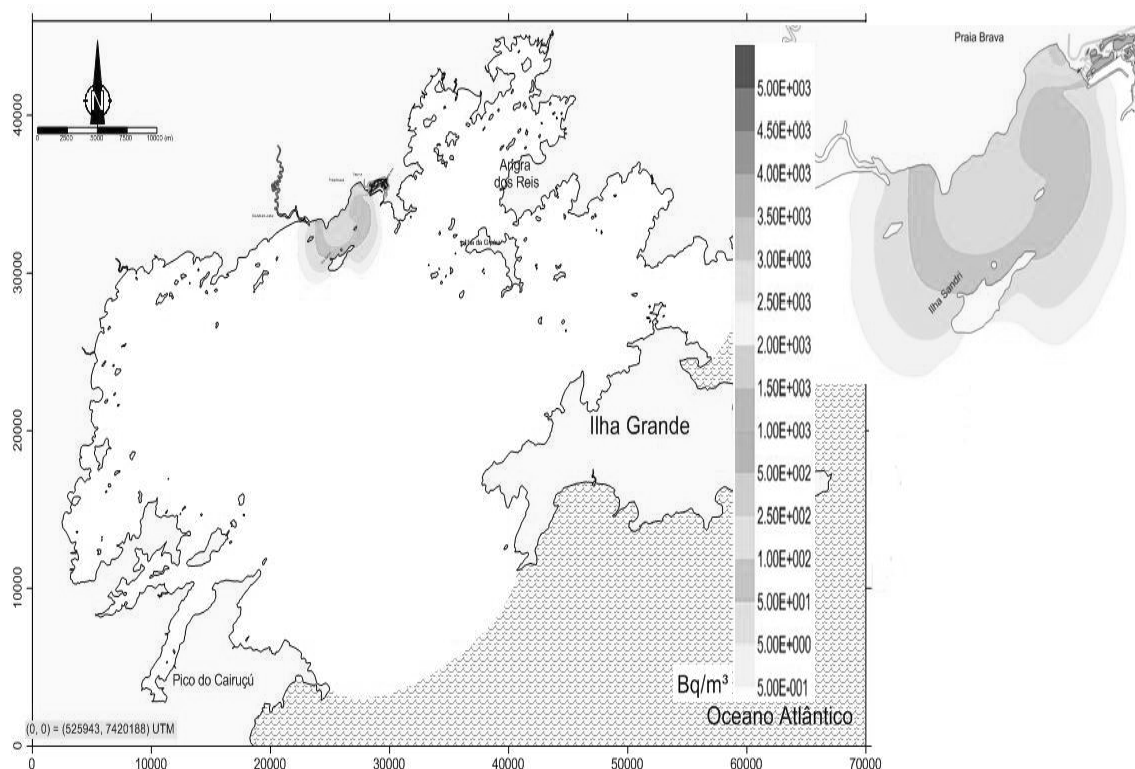


Figura 25 – Dispersão da pluma de trício 22 horas após o acidente.

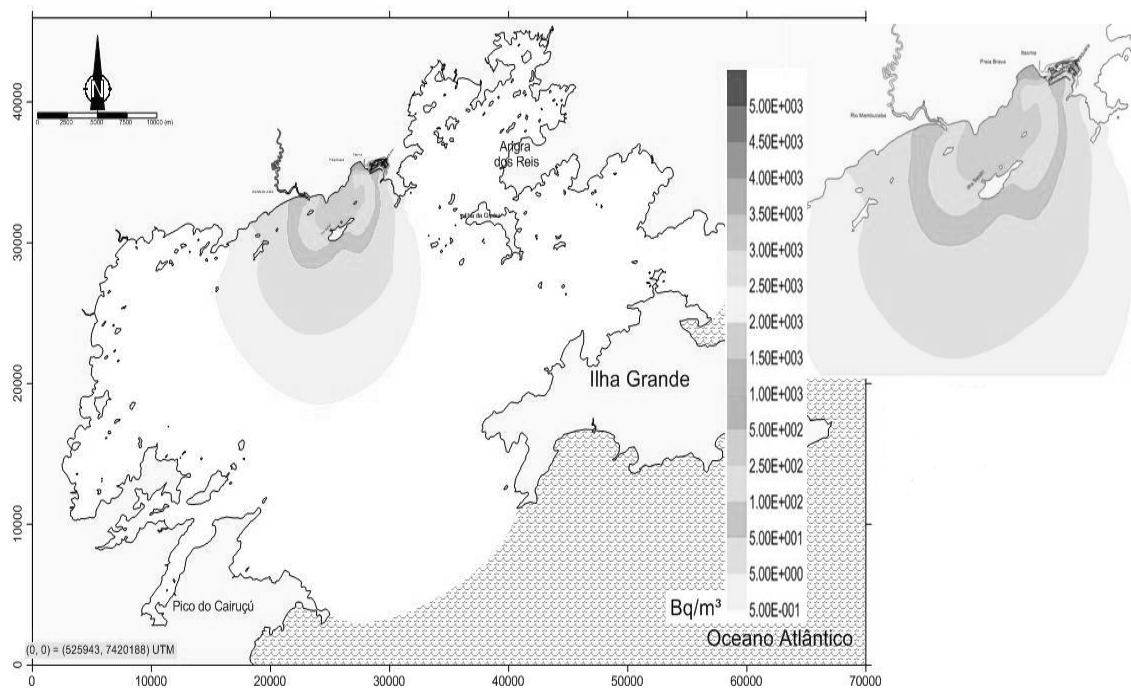


Figura 26 – Dispersão da pluma de trítio 30 horas após o acidente.

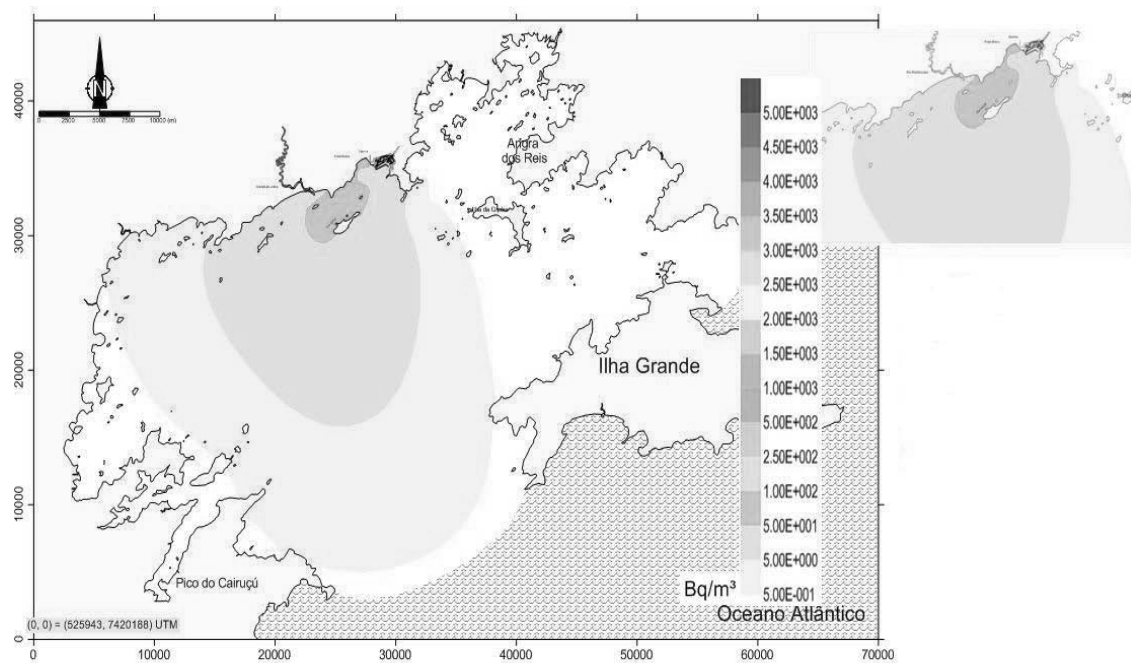


Figura 27 – Dispersão da pluma de trítio 79 horas após o acidente.

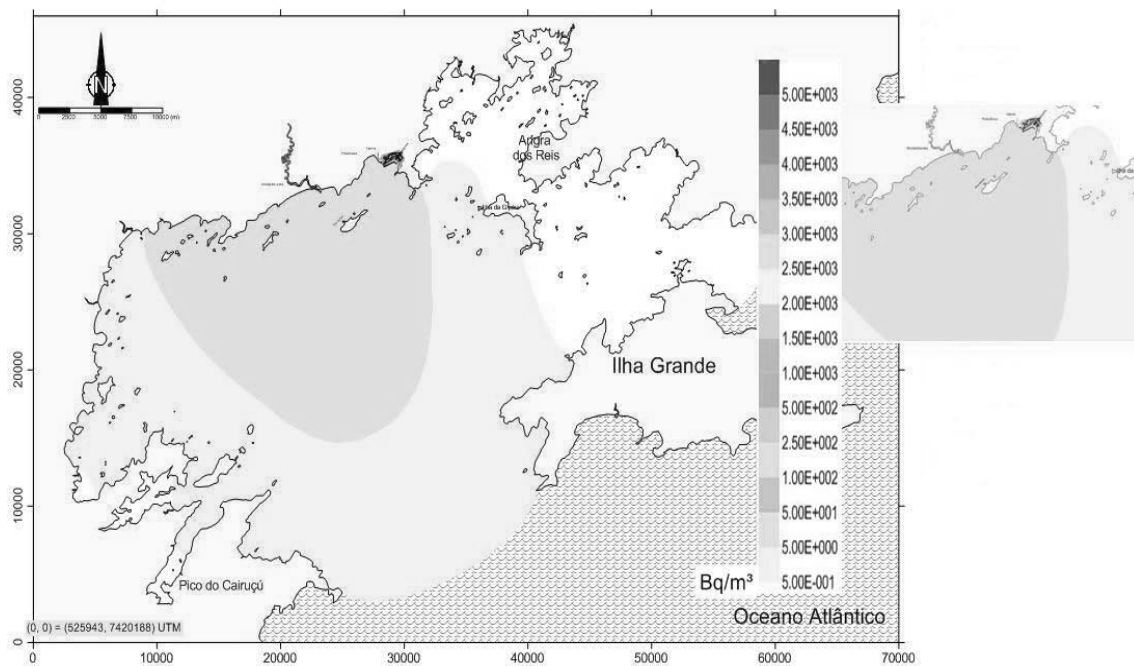


Figura 28 – Dispersão da pluma de trítio 170 horas após o acidente.

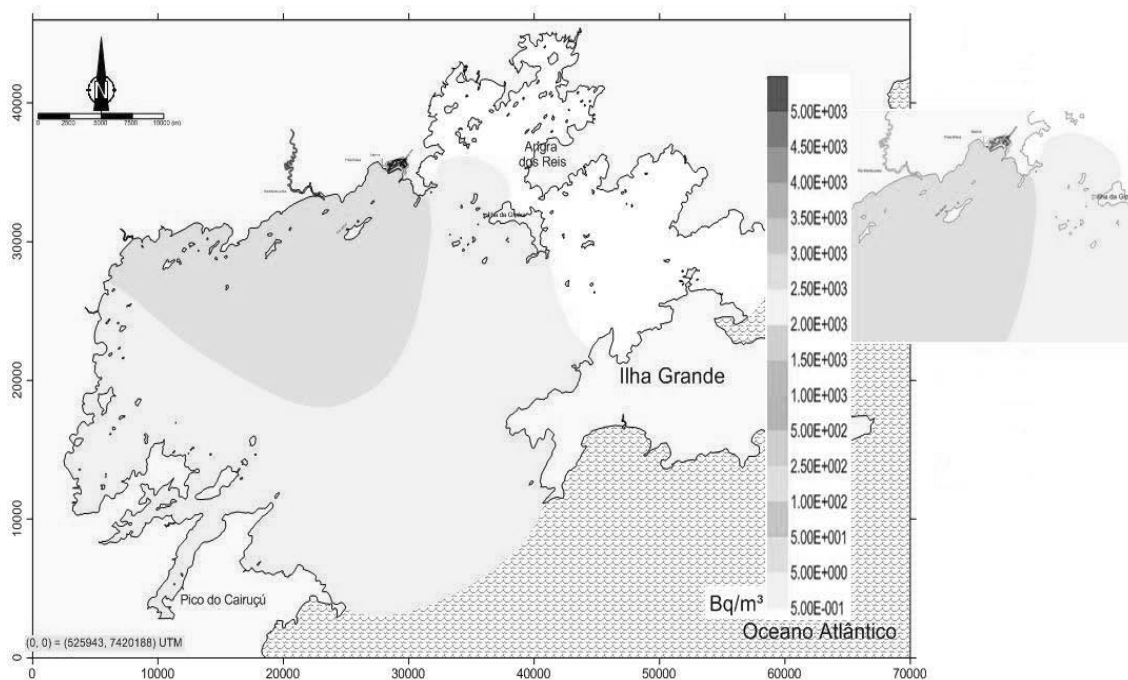


Figura 29 – Dispersão da pluma de trítio 333 horas após o acidente.

6.4.2 COBALTO

A concentração de atividade inicial no *Nó* central do lançamento é de $1,73 \times 10^4$ Bq/m³ e nos dois laterais $8,64 \times 10^3$ Bq/m³.

Apresentam-se nesta seção os resultados relevantes que mostram a dispersão na Baía da Ilha Grande da liberação do inventário do primário, tendo como análise o cobalto no período de 14 dias a partir do instante do acidente (LBLOCA).

Nas primeiras 22 horas após o acidente, em situação de meia maré enchente de sizígia, podem ser observadas atividades compreendidas de 0,15 Bq/m³ a 0,25 Bq/m³ que se estende a partir da praia Brava até a Ilha Sandri. Isto ocorre devido à baixa diluição neste período e ao vórtice presente ao longo desta extensão o que ocasiona um aumento da concentração, vide figura 30.

Em 30 horas de simulação, em condição de meia maré vazante de sizígia, a pluma se apresenta mais concentrada próximo a Ilha Sandri, com atividade máxima de 0,075 Bq/m³, e num raio de aproximadamente 5 km com atividade mínima de 0,0025 Bq/m³, vide figura 31.

No instante de 54 horas após o acidente, em situação de meia maré vazante de sizígia, a pluma que tinha sua maior concentração de atividade nas proximidades da Ilha Sandri – 0,075 Bq/m³, agora apresenta uma atividade de apenas 0,025 Bq/m³ nas cercanias da ilha, tendo 0,1% da concentração de atividade inicial da fonte. A pluma desloca-se para o Sul em direção à fronteira aberta 1 com atividade mínima de aproximadamente 0,0025 Bq/m³ que corresponde a 0,01% da concentração de atividade inicial da fonte, vide figura 32.

No instante de 79 horas de simulação, em situação de meia maré vazante de sizígia, é observado, na Praia Brava, valores muito abaixo do valor mínimo de atividade, 0,0025 Bq/m³. No ponto de lançamento tem-se 0,01% da concentração de atividade inicial da fonte e nas cercanias da Ilha Sandri uma atividade de 0,005 Bq/m³, vide figura 33.

Passados 103 horas de simulação, em situação de meia maré vazante de sizígia, ainda com o funcionamento de captação e descarga de Angra 3, é observado que para esse tipo de radionuclídeo a pluma fica estagnada no entorno da Ilha Sandri e no ponto de lançamento, os níveis de atividades estão muito abaixo da atividade mínima, bem como no instante de 121 horas, onde toda a BIG está com valor inferior ao mínimo, vide figura 34.

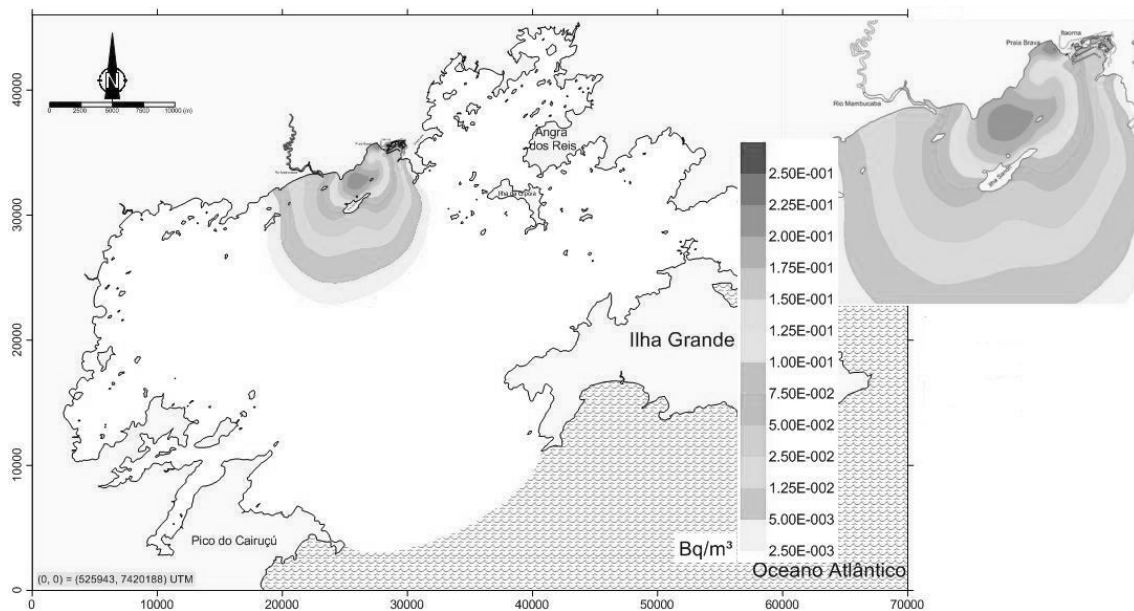


Figura 30 – Dispersão da pluma de cobalto 22 horas após o acidente.

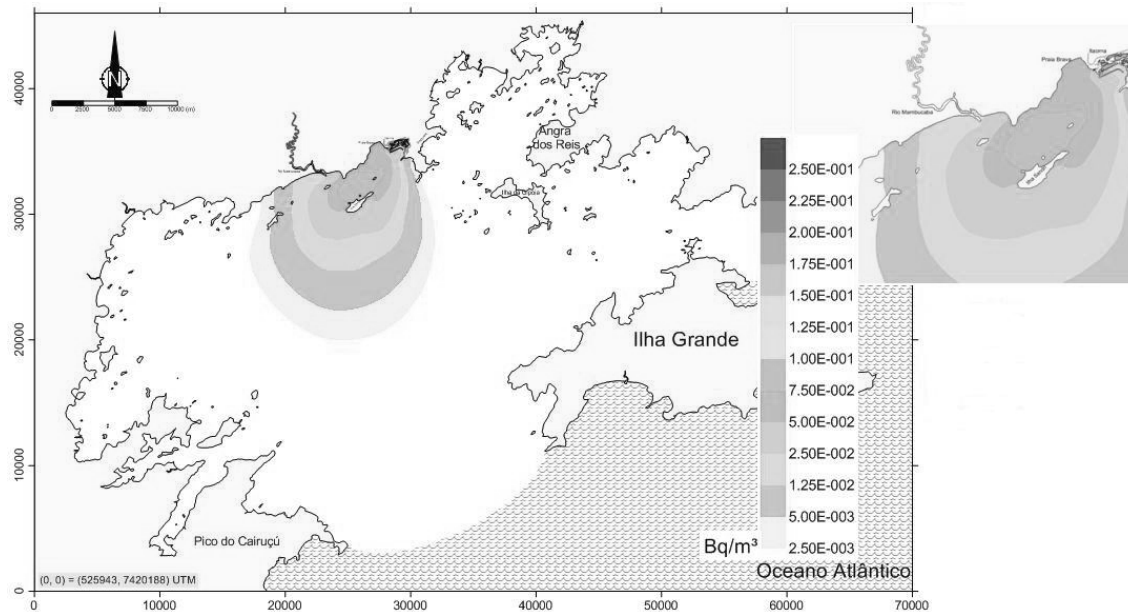


Figura 31 – Dispersão da pluma de cobalto 30 horas após o acidente.

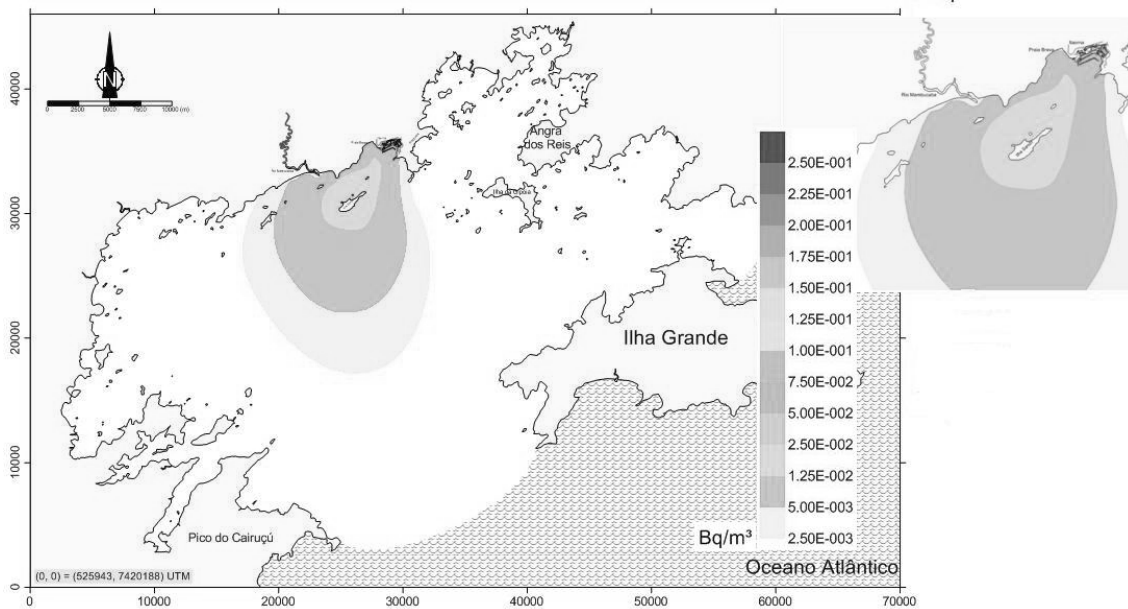


Figura 32 – Dispersão da pluma de cobalto 54 horas após o acidente.

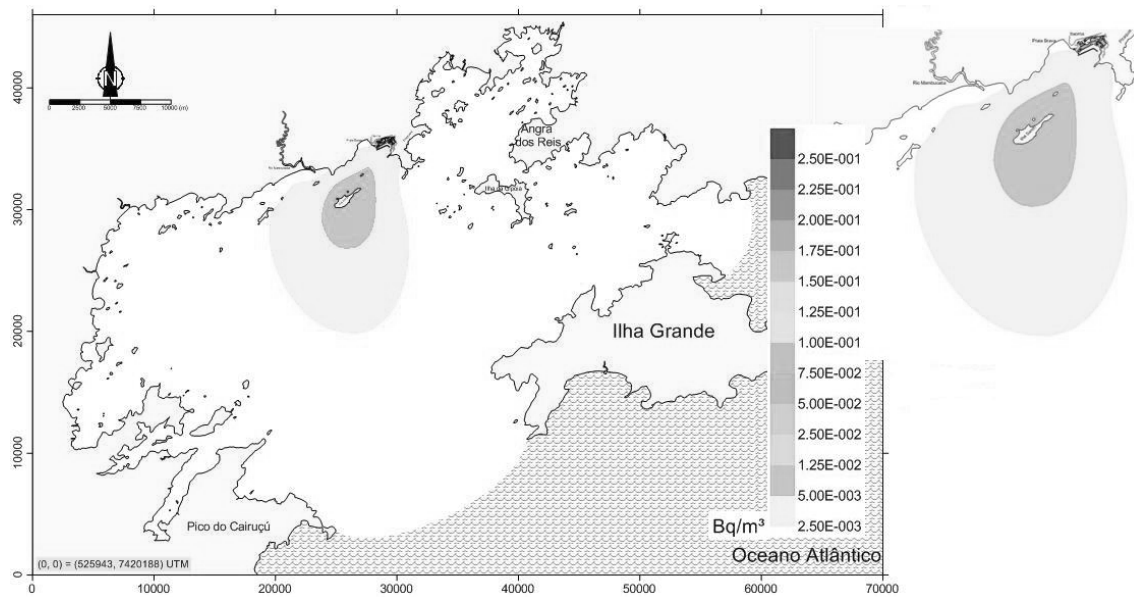


Figura 33 – Dispersão da pluma de cobalto 79 horas após o acidente.

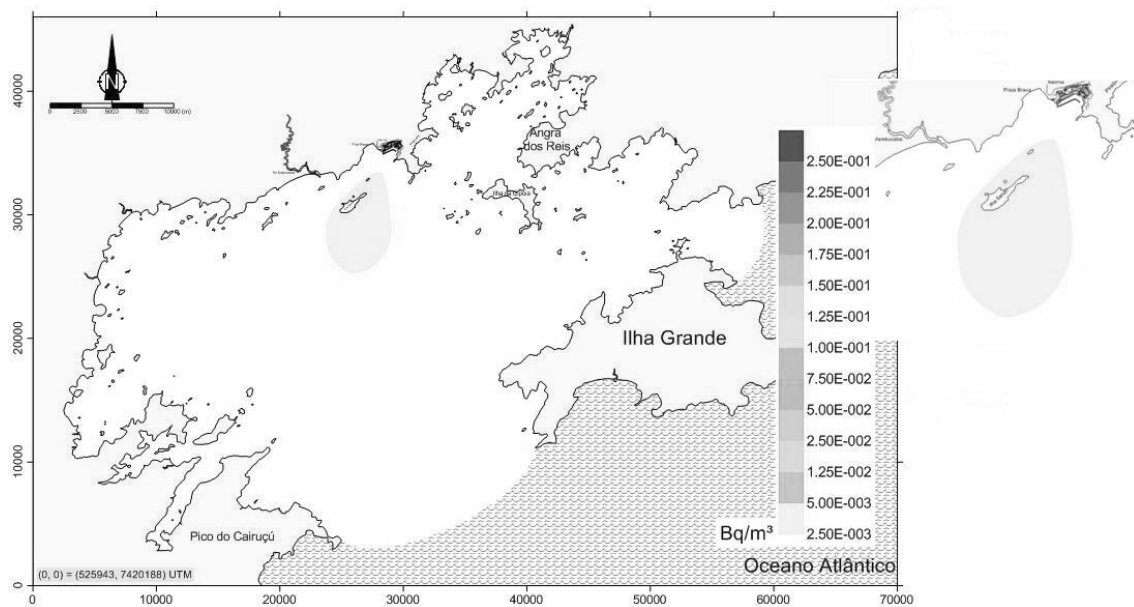


Figura 34 – Dispersão da pluma de cobalto 103 horas após o acidente.

6.4.3 CÉSIO

A concentração de atividade inicial no *Nó* central do lançamento é de $2,710 \times 10^5$ Bq/m³ e nos dois laterais $1,355 \times 10^5$ Bq/m³.

Apresentam-se nesta seção os resultados relevantes que mostram a dispersão na Baía da Ilha Grande da liberação do inventário do primário, tendo como análise o césio no período de 14 dias a partir do instante do acidente (LBLOCA).

Logo nas primeiras 22 horas de simulação, em situação de meia maré enchente de sizígia, a pluma já possui um deslocamento de aproximadamente 5 km. Nas proximidades da Praia Brava encontram-se variações nas concentrações de atividade que vai de 10,5 Bq/m³ a 13,5 Bq/m³. No ponto de lançamento a atividade está compreendida num valor que vai de 4,5 Bq/m³ a 6 Bq/m³, já nas proximidades da Ilha Sandri a atividade máxima é de 3 Bq/m³, vide figura 35.

No instante de 30 horas, em situação de meia maré vazante de sizígia, observa-se uma atividade máxima de 3 Bq/m³ compreendida desde o ponto de lançamento até a parte mais ao norte da Ilha Sandri. O fator de diluição é de 0,2% da concentração de atividade inicial da fonte, vide figura 36.

A pluma no instante de 54 horas, em situação de meia maré vazante de sizígia, desloca-se para o Sul em direção à fronteira aberta 1 com atividade mínima de aproximadamente 0,15 Bq/m³ que corresponde 0,01% da concentração de atividade inicial da fonte. No ponto de lançamento a atividade já tem seu valor reduzido para 0,3 Bq/m³, vide figura 37.

Passados 79 horas de simulação, em situação de meia maré de sizígia, a diluição da pluma mais ao Sul já apresenta um fator de 0,01% da concentração de atividade inicial da fonte, e do ponto de lançamento até toda extensão da Ilha Sandri a atividade máxima é de 0,3 Bq/m³, vide figura 38.

Em 170 horas de simulação, em situação de meia maré enchente de sizígia, a pluma se apresenta bastante diluída num fator de 0,01% da concentração de atividade inicial da fonte e atividade total desta pluma de 0,15 Bq/m³. Neste instante os valores de captação e descarga de Angra 3 já estão com seus valores de vazão próximos de zero. Na Praia Brava a atividade já se encontra com valores inferiores ao valor mínimo, vide figura 39.

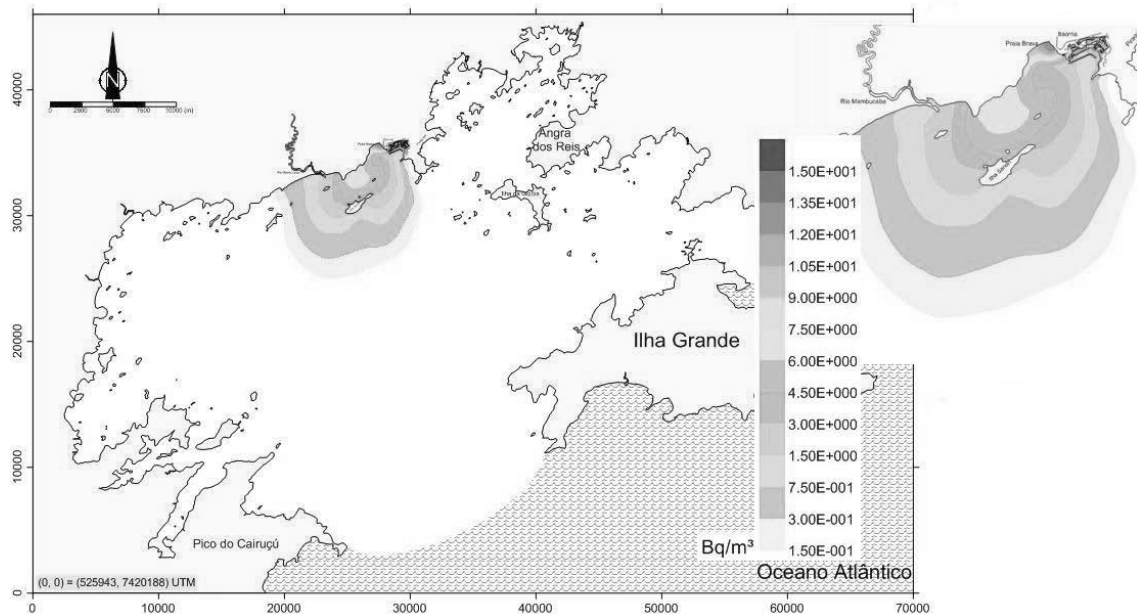


Figura 35 – Dispersão da pluma de césio 22 horas após o acidente.

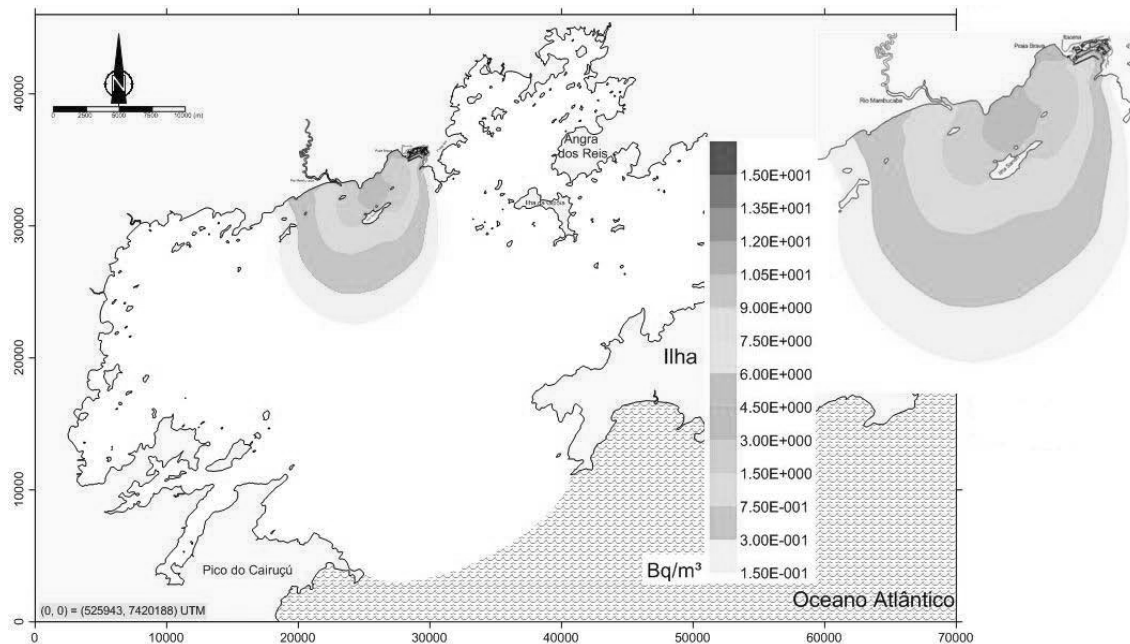


Figura 36 – Dispersão da pluma de céσιο 30 horas após o acidente.

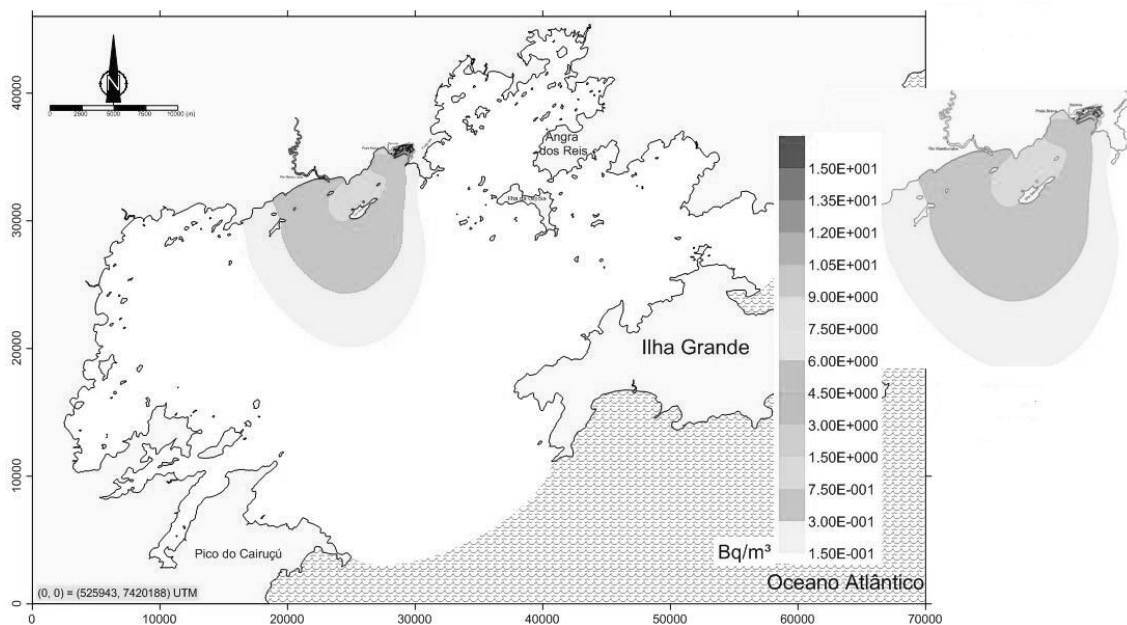


Figura 37 – Dispersão da pluma de céσιο 54 horas após o acidente.

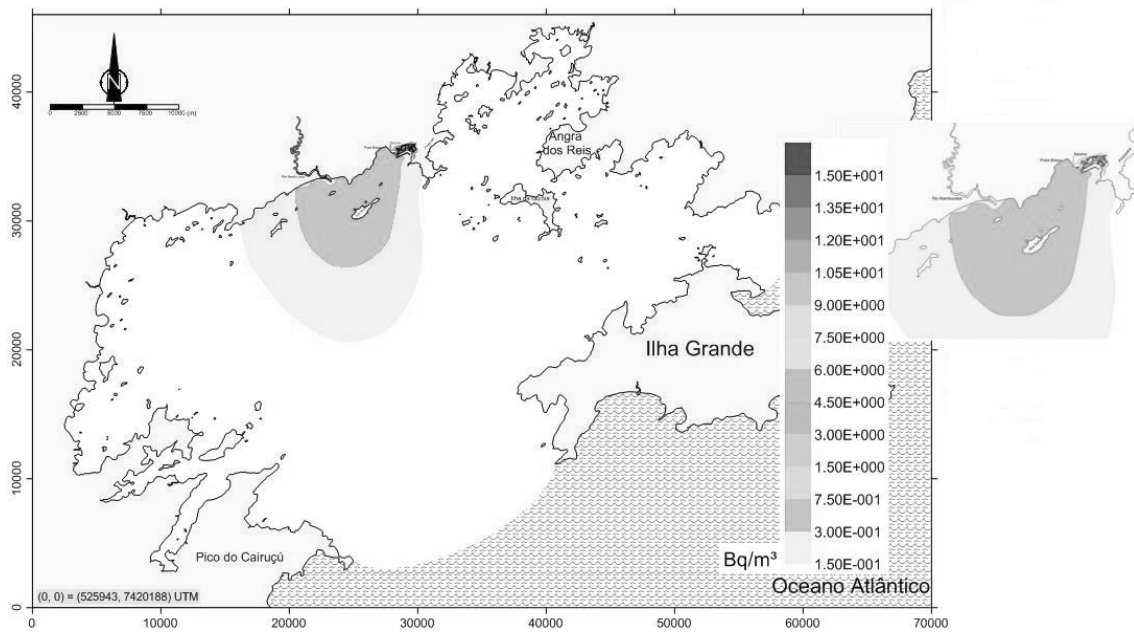


Figura 38 – Dispersão da pluma de césio 79 horas após o acidente.

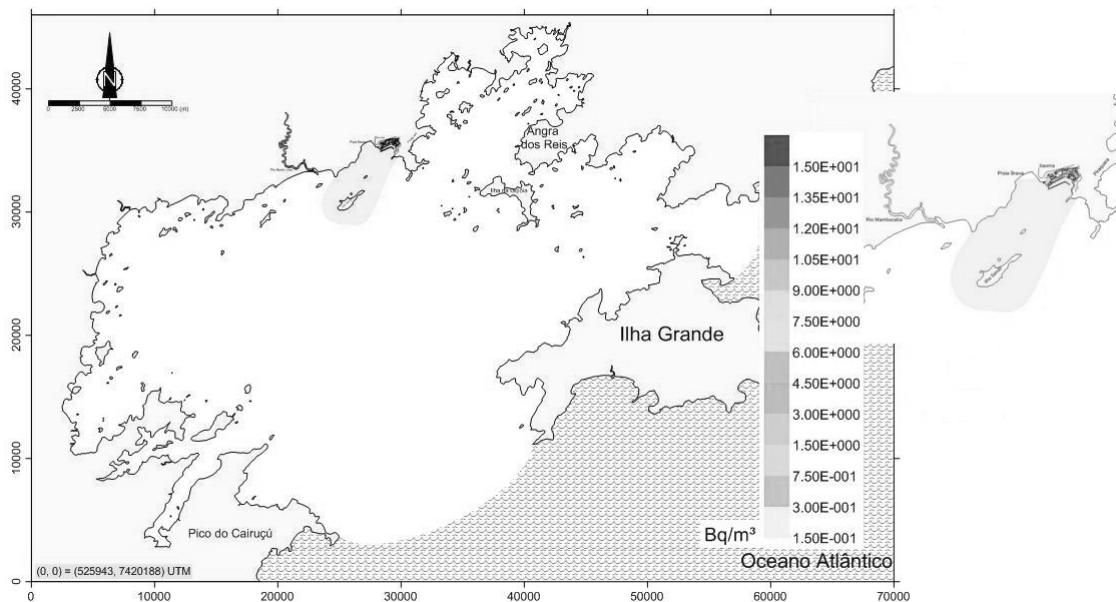


Figura 39 – Dispersão da pluma de césio 170 horas após o acidente.

6.5 AVALIAÇÃO DO IMPACTO

Na área nuclear, o controle de uma instalação como a CNAAA, é feita de maneira globalizada, levando em consideração a contribuição de todos os radionuclídeos e vias de exposição aos quais a população esteja potencialmente exposta. Este tipo de atividade é considerada uma prática e deve ser submetida a todo o processo de licenciamento e controle prevista pela legislação. O controle exercido pela autoridade regulatória, no caso a CNEN, é baseado nos três princípios básicos da Radioproteção (CNEN, 1988):

1) **Justificativa** – nenhuma prática deve ser autorizada a menos que introduza benefícios aos indivíduos expostos ou para a sociedade, que possam compensar os perigos associados à radiação;

2) **Otimização** – todas as exposições devem ser mantidas tão baixas quanto racionalmente possíveis, levando em conta fatores econômicos e sociais;

3) **Limitação da Dose** – a exposição normal do indivíduo deve ser restringida de maneira que o equivalente de dose, resultante de todas as possíveis combinações das exposições decorrentes da prática, não excedam aos limites recomendados para a circunstância apropriada.

Para a elaboração de um cenário ambiental da área do empreendimento, foram definidas as *Áreas de Influência* para o meio Biótico. A área de influência indireta está definida em um raio de 10 km a partir do empreendimento, correspondendo a uma área de possível dispersão da biota que possa sofrer com impactos gerados pelo empreendimento. A área de influência direta é delimitada por um raio de 5 km ao redor do empreendimento, em função da dispersão de resíduos que possam impactar diretamente o meio biótico, por meio da contaminação.

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 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 μ Sv/ano - meta de otimização

Requer que os operadores das plantas nucleares mantenham as doses dos efluentes tão baixas quanto razoavelmente exequível (princípio ALARA) para o público. O objetivo ALARA para liberação de efluentes líquidos, são doses anuais para indivíduos do público com exposição máxima (grupo crítico) de 30 e 100 μ 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).

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.

Comparando os resultados obtidos pelo modelo numérico na região de lançamento, até uma distância de aproximadamente 2,5 km da fonte, onde as maiores concentrações de atividade, após 22 horas, são observadas para o ^3H – 10^3 Bq/m³, ^{60}Co – $2,5 \times 10^{-1}$ Bq/m³ e ^{137}Cs – 13,5 Bq/m³, com os limites de detecção recomendados pela IAEA, para um laboratório de uma central nuclear, para o ^3H – $1,11 \times 10^5$ Bq/m³, ^{60}Co – $5,55 \times 10^2$ Bq/m³ e ^{137}Cs – $6,66 \times 10^2$ Bq/m³) (FSAR,2010), percebe-se que os resultados obtidos pelo modelo encontram-se abaixo dos valores de limites de detecção recomendados pela IAEA. Os limites de referência para o ^3H , ^{60}Co e ^{137}Cs , respectivamente em água do mar são $1,11 \times 10^6$ Bq/m³, $1,11 \times 10^4$ Bq/m³ e $1,85 \times 10^3$ Bq/m³ (FSAR, 2010). Comparando os resultados de concentração de atividade obtidos pelo modelo com os limites de referência para água do mar, nota-se que os obtidos pelo modelo se encontram abaixo desses limites de referência.

Com base no que foi exposto pode-se concluir que, do ponto de vista da exposição da população aos radionuclídeos simulados, os resultados da concentração de atividade obtidos pelo modelo, após 22 horas, sugerem que o impacto radiológico observado, é insignificante, estando muito abaixo dos limites de detecção, recomendados pela IAEA, e dos limites de referência para água do mar.

Para a área de influência direta o valor máximo, após 22 horas, dos radionuclídeos simulados encontra-se com valores muito abaixo dos limites de detecção recomendados pela IAEA e para os limites na água do mar. Como o modelo só avaliou as concentrações a partir das primeiras 22 horas, vale salientar, que nas primeiras horas, as concentrações dos radionuclídeos excedem os valores de limite de detecção, mas não os limites de referência na água do mar. No entanto, existem limitações do modelo hidrodinâmico referentes a estabilização do campo de velocidade nas primeiras horas que tornam inadequada a utilização desses resultados.

De qualquer forma, seria recomendável o isolamento do local da descarga nas primeiras 22 horas, a fim de evitar exposições indevidas de indivíduos do público, sendo que tal ação é prevista no plano de emergência da instalação. Para a área de influência indireta, os níveis de concentração, após

5 km, no instante de 54 horas, já apresentam valores abaixo dos valores mínimos de atividade detectados pelo Laboratório de Monitoração Ambiental de Angra 2, cujos valores são para o ^3H , ^{60}Co e ^{137}Cs , respectivamente $5,2 \times 10^4$ Bq/m³, $3,0 \times 10^2$ Bq/m³ e $2,5 \times 10^2$ Bq/m³ (FSAR, 2010).

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

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 podem variar de forma acentuada, devido a incertezas nas condições de contorno e na diluição inicial do termo fonte.

A partir dos resultados obtidos pela modelagem ambiental da dispersão em caso de acidente, LBLOCA, dos radionuclídeos simulados proveniente de um reator tipo PWR, o presente estudo concluiu que:

- O modelo hidrodinâmico do SisBaHiA reproduziu corretamente as marés de enchente e vazante, nos períodos de quadratura e sizígia, além do regime local de ventos.
- Os principais mecanismos responsáveis pela dispersão dos radionuclídeos na BIG foram a advecção hidrodinâmica da BIG, que os transportam em conjunto com o movimento das massas d'água e a difusão turbulenta 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 pluma de trício nas primeiras 22 horas após o acidente apresenta atividades de 1000 Bq/m³ e 500 Bq/m³ junto a Praia Brava, e no ponto de lançamento até a Ilha Sandri, respectivamente – 250 Bq/m³ e 50 Bq/m³. No instante de 79 horas a pluma se move predominantemente para o Sul e Sudoeste em direção à fronteira aberta 1. Esta aceleração do transporte se deve ao fato da pluma de trício ter encontrado correntes de maior velocidade em direção ao centro da Baía. Passados 333 horas observa-se um incremento acentuado na diluição da pluma que

chega a entrar na Baía da Ribeira numa concentração de atividade de $0,5 \text{ Bq/m}^3$. Há o preenchimento de toda a parte oeste e também da fronteira aberta 1, a pluma se estabiliza no instante de 340 horas de simulação.

- A pluma de cobalto nas 22 horas após o acidente tem atividades compreendidas de $0,15 \text{ Bq/m}^3$ a $0,25 \text{ Bq/m}^3$ que se estende a partir da praia Brava até a Ilha Sandri. Passados 103 horas a pluma fica estagnada no entorno da Ilha Sandri e no ponto de lançamento, os níveis de atividades estão muito abaixo da atividade mínima, bem como toda a extensão da BIG no instante de 121 horas.
- A pluma de cézio já possui um deslocamento de aproximadamente 5 km, no instante de 22 horas após o acidente. Nas proximidades da praia Brava encontram-se variações nas concentrações de atividade que vai de $10,5 \text{ Bq/m}^3$ a $13,5 \text{ Bq/m}^3$, próximo a Ilha Sandri a atividade máxima é de 3 Bq/m^3 . Passados 79 horas de simulação a pluma mais ao Sul já apresenta um fator de 0,01% da concentração de atividade inicial da fonte, e do ponto de lançamento até toda extensão da Ilha Sandri a atividade máxima é de $0,3 \text{ Bq/m}^3$.
- Quanto à exposição da população aos radionuclídeos simulados presentes nos efluentes da CNAAA, as concentrações de atividade obtidas pelo modelo sugerem que nenhum impacto radiológico significativo esteja ocorrendo a partir das 22 horas após o acidente, conforme os limites de detecção recomendados pela IAEA, limites de referência na água do mar e os limites mínimos de atividade detectados pelo Laboratório de Monitoração Ambiental de Angra 2.
- É importante salientar, que no momento inicial anterior as primeiras 22 horas, as concentrações dos radionuclídeos excedem os valores de limite de detecção, mas não excedem os

limites na água do mar. A recomendação de isolamento da área já é prevista no plano de emergência da instalação.

- Recomenda-se simular a dispersão de mais radionuclídeos (e.g. ^{144}Ce , ^{90}Sr , ^{55}Fe e ^{54}Mn) presentes nos efluentes da CNAAA com comportamento não conservativo.

O presente estudo procurou avaliar um cenário de impacto aquático de um reator PWR, que corresponde a situação mais grave que poderia ocorrer em termos de acidente envolvendo a liberação exclusiva de efluentes líquidos no meio hídrico. Nesse contexto, optou-se por simular o acidente a partir de Angra 3 com liberação do termo fonte diretamente em Itaorna, pois esta seria a pior condição possível em termos de dispersão dos radionuclídeos, uma vez que Itaorna é uma enseada bem mais aberta e com circulação mais rápida que o atual ponto de descarga de efluentes (Piraquara de Fora). Assim, pode-se concluir que, apesar das limitações do estudo, não há qualquer impeditivo do ponto de vista do impacto ambiental relacionado ao lançamento de efluentes em Itaorna.

Comparando os resultados do trabalho de dissertação de Soares (2010), que inseriu um CANDU de terceira geração, onde está sendo construído Angra 3, com os dados fornecidos por esta simulação em um reator PWR, observa-se, para dispersão da pluma de trício, que o reator tipo PWR tem menor impacto no meio ambiente do que um reator CANDU. Analisando as mesmas 54 horas, o nível de concentração de atividade máximo, neste tipo de acidente envolvendo o CANDU chega a um valor de 10^7 Bq/m³, nível acima dos limites de detecção, recomendados pela IAEA, e o limite de referência em água do mar. Isso sugere que o reator tipo PWR tem menor impacto ambiental em caso de acidente com liberação de efluentes líquidos.

APÊNDICE A: SIMCAT – SIMulation of the water quality of CATchments.

Segue-se abaixo, a relação de alguns documentos com seus referidos links, a fim de que possam estar elucidados alguns parâmetros quanto ao entendimento deste software.

- Site oficial do software, disponível em: <http://www.wrcplc.co.uk/default.aspx?item=931> >, acessado em outubro de 2010.
- Wilson, Alvin. **SIMCAT Modelling**. Disponível em: < <http://www.ni-environment.gov.uk/lfcsg-19march2008-simcat-alvinwilson.pdf> >, acessado em outubro de 2010.
- Environment Agency. **SIMCAT Modelling Report**. Disponível em: <http://www.ashford.gov.uk/pdf/Appendix%207.2%20-%20SIMCAT%20Modelling%20Report.pdf> >, acessado em outubro de 2010.
- CIWEM ANNUAL CONFERENCE 2009 - **WATER and the GLOBAL ENVIRONMENT**. Disponível em: < <http://www.ciwem.org/media/53808/B-Crabtree.pdf> >, acessado em outubro de 2010.
- SIMCAT Modelling in the Flemish region of Belgium. Disponível em: < <http://www.wrcgroup.com/pdf/simcatbelgium.pdf> >, acessado em outubro de 2010.

APÊNDICE B : PC – QUASAR – Quality Simulation Along Rivers

Segue-se abaixo, a relação de alguns documentos com seus referidos links, a fim de que possam estar elucidados alguns parâmetros quanto ao entendimento deste software.

- Site oficial do software, disponível em: <http://www.ceh.ac.uk/products/software/water.html> >, acessado em outubro de 2010.
- Centre for Ecology & Hydrology. **Quality Simulation Along Rivers**. Disponível em: <http://www.ceh.ac.uk/products/software/documents/PC-QUASARleaflet.pdf> >, acessado em outubro de 2010.
- Matthew J. Lees. **Extension of the QUASAR river water quality model to incorporate dead-zone mixing**. Disponível em : <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/2/353/1998/hess-2-353-1998.pdf> >, acessado em outubro de 2010.
- Paul Whitehead. **Heavy metals from acid mine drainage – Impacts and modelling strategies**. Disponível em: http://iahs.info/redbooks/a230/iahs_230_0055.pdf >, acessado em outubro de 2010.

APÊNDICE C : MIKE 11

Segue-se abaixo, a relação de alguns documentos com seus referidos links, a fim de que possam estar elucidados alguns parâmetros quanto ao entendimento destes softwares.

- Site oficial do software, disponível em: <http://www.dhigroup.com/> >, acessado em outubro de 2010.
- Water Resources. **MIKE 11 – River Modelling Unlimited**. Disponível em: <http://www.portcoast.com.vn/MIKE.pdf> >, acessado em outubro de 2010.
- DHI – WATER & ENVIRONMENT. **MIKE 11 – A Modelling System for Rivers and Channels**. Disponível em: <http://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/geooekologie/mike-11-short-introduction-tutorial.pdf> >, acessado em outubro de 2010.
- DHI Software Conf. **Mike 11 as Flood Management and Flood Forecasting Toll for the Odra River, Poland**. Disponível em : http://www.dhigroup.com/upload/publications/mike11/Stronska_MIKE_11_as_flood.pdf >, acessado em outubro de 2010.
- Carlos Eduardo de Oliveira Dantas. **Análise dos efeitos dinâmicos em reservatórios de grande extensão: Reservatório de Sobradinho**. Disponível em : http://www.cprm.gov.br/publique/media/mestre_carlos_eduardo_dantas.pdf >, acessado em outubro de 2010.
- DHI – WATER & ENVIRONMENT. **MIKE 21 Flow Model**. Disponível em: <http://www.dhigroup.com/upload/dhisoftwarearchive/papersanddo>

[cs/hydrodynamics/MIKE21SignificantFlodryGuidelines.pdf](#) >, acessado em outubro de 2010.

- DHI – WATER & ENVIRONMENT. **MIKE 21 Flow Model – Hydrodynamic module step-by-step trainig guide**. Disponível em:
http://www.hydroasia.org/jahia/webdav/site/hydroasia/shared/Document_public/Project/Manuals/WRS/MIKE21_HD_Step_By_Step.pdf >, acessado em outubro de 2010.

APÊNDICE D : QUAL2E

Segue-se abaixo, a relação de alguns documentos com seus referidos links, a fim de que possam estar elucidados alguns parâmetros quanto ao entendimento deste software.

- Site oficial do software, disponível em: <http://www.epa.gov/> >, acessado em outubro de 2010.
- Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Aplicação do Modelo QUAL2E na simulação de descargas acidentais de contaminantes.** Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes97/qual.pdf> >, acessado em outubro de 2010.
- Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. **O coeficiente de reoxigenação no modelo QUAL2E: Metodologia de previsão.** Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes97/coeficiente.pdf> >, acessado em outubro de 2010.
- Eduardo Queija de Siqueira. **O modelo QUAL2E na modelação de OD no Rio Meia Ponte, Estado de Goiás.** Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/caliagua/peru/bracca009.pdf> >, acessado em outubro de 2010.
- Vivian Palmieri. **Calibração do Modelo QUAL2E para o Rio Corumbataí (SP).** Disponível em: http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0124936_03_pretextual.pdf >, acessado em outubro de 2010.

APÊNDICE E : WASP – Water Quality Analysis Simulation Program

Segue-se abaixo, a relação de alguns documentos com seus referidos links, a fim de que possam estar elucidados alguns parâmetros quanto ao entendimento deste software.

- Site oficial do software, disponível em: <http://www.epa.gov/> >, acessado em outubro de 2010.
- Environmental Protection Agency. **Water Quality Analysis Simulation Program**. Disponível em: <http://www.epa.gov/athens/wwqtsc/WASP.pdf> >, acessado em outubro de 2010.
- Environmental Protection Agency. **Watershed and Water Quality Modelling**. Disponível em: http://epawasp.com/files/Release_Notes.pdf >, acessado em outubro de 2010.
- Environmental Protection Agency. **Water Quality Analysis Simulation Program**. Disponível em: <http://wikis.lib.ncsu.edu/images/2/27/BAE573-tmdl13.pdf> >, acessado em outubro de 2010.
- W. Balcerzak. **The Protection of Reservoir Water against the Eutrophication Process**. Disponível em: <http://www.pjoes.com/pdf/15.6/837-844.pdf> >, acessado em outubro de 2010.

APÊNDICE F : SISBAHIA – Sistema base de Hidrodinâmica Ambiental

Segue-se abaixo, a relação de alguns documentos com seus referidos links, a fim de que possam estar elucidados alguns parâmetros quanto ao entendimento deste software.

- Site oficial do software, disponível em: <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/> >, acessado em outubro de 2010.
- VIII Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite – OMAR-SAT. **Hidrodinâmica do Sistema Estuarino Lagunar do Rio Itapocú/Barra Velha-SC.** Disponível em: http://www.ieapm.mar.mil.br/omarsat2009/omar2009/Benevides_et_al_2009.pdf >, acessado em outubro de 2010.
- VIII Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite – OMAR-SAT. **Simulação de Derrames de Óleo ao Largo da Ilha de São Francisco do Sul – SC.** Disponível em: http://www.ieapm.mar.mil.br/omarsat2009/omar2009/Fiedler_et_al_2009.pdf >, acessado em outubro de 2010.
- Paulo C.C. Rosmam. **Caracterização da Circulação Hidrodinâmica Bidimensional da Baía de Sepetiba.** Disponível em: <http://www.lemma.ufpr.br/wiki/images/2/2d/Hidrosep.pdf> >, acessado em outubro de 2010.
- Jorlaine Machado de Siqueira. **Estudo do Mecanismo de Alagamento e Secamento em modelo computacional 2DH.** Disponível em:

http://www.ct.ufes.br/ppgea/files/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Jorlaine.pdf >, acessado em outubro de 2010.

- Adriano Gomes Batista. **Construção de um modelo de dispersão de poluentes na Baía do Guajará**. Disponível em: http://www.ufpa.br/ppgem/Documentos/Dissertacoes/Adriano%20Batista/dissertacao_Adriano%20Batista.pdf >, acessado em outubro de 2010.

Teses e dissertações que contribuíram no desenvolvimento de modelos do SisBahia, no link abaixo estão elencados todos esses trabalhos.

- <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/PesquisasTeses.htm> >, acessado em outubro de 2010.

No link abaixo pode ser acessado o documento editado pelo Paulo Cesar Colonna Rosman, professor do Departamento de Recursos Hídricos & Meio Ambiente da Escola Politécnica e da Área de Engenharia Costeira & Oceanográfica da Coppe, onde neste documento se encontra todos os formalismos matemáticos para melhor entendimento dos modelos Hidrodinâmico, Euleriano de transporte advectivo-difusivo e todos aqueles utilizados nesta dissertação.

- http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V8.pdf >, acessado em outubro de 2010.

Algumas simulações estão presentes no link abaixo.

- <http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/animacao.php> >, acessado em outubro de 2010.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOT, M. B. and Basco, D. R. **Computational fluid dynamics an introduction for engineer**. Longman Scientific, 1989.

ANDRADE, Devonei Alves de & Sabundjian, Gaiandê. **Simulação de um acidente de perda de refrigerante primário pro grande ruptura na perna quente da Usina Angra 2 com o código RELAP5/MOD3.2.2G**. Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Paper CIT04-0723, 2004.

ARAÚJO, A. M. **Um sistema computacional para simulação do escoamento e transporte fluido turbulentos em corpos d'água rasos**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 136p, 1993.

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 Relevô Submarino e a Sedimentação no Canal Central**. Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 20 (1), p. 05-15, 2002.

BENSS, P. et alii. **Analysis of the Interaction of Radionuclidea with Solid Phase in Surface Waters Using Laboratory Model Experimenta**. AnalHucl Cham. : Articlâa. 12S (2), 1988.

BIOTEC, Assessoria Técnica e Científica Limitada. **Caracterização dos sedimentos marinhos na área de dispersão do efluente da CNAAA e anexos**. Projeto – Complementação das medidas em laboratório / sedimentos/ estudos N°3/ Contrato n°3029, 1972.

BRUGNARA, M. **Influência dos sedimentos marinhos na distribuição dos principais radionuclídeos do efluente da Central Nuclear Almirante Álvaro**

Alberto (unidade 1). Tese de M.Sc. Instituto de Biofísica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 96p, 1977.

BUCHNER, F. Estimation of the Frequency of Events for Angra 2/3 which are not coped-with by the Safety Systems on the Basis of the Results of the DRS-B", KWU - Report R22/90/e031, 1990.

CNEN, Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Diretrizes básicas de radioproteção.** Norma CNEN-NE-3.01, 129p, 1988.

COSTA, H. Uma avaliação da qualidade das águas costeiras do estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Fundação de Estudos do Mar - Femar, 1998.

DAVIES, A. M., Jones, J. E. and Xing, J. "Review of recent developments in tidal hydrodynamic modeling I: Spectral Models", Journal of Hydraulic Engineering, vol. 123 N^o. 4. ASCE, 1997a.

DAVIES, A. M., Jones, J. E. and Xing, J. "Review of recent developments in tidal hydrodynamic modeling II: Turbulence energy models", Journal of Hydraulic Engineering, vol. 123 N^o 4. ASCE, 1997b.

ENCAL S.A. Engenheiros Construtores e Aerolevantamentos. **Medições de correntes em Piraquara- Angra dos Reis**, Relatório Técnico, 1982.

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.

FEMAR. Estudo das Enseadas de Itaorna, Mamede e Piraquara de Fora. Volume II. Hidrologia. Relatório Técnico, 1972b.

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.

FSAR, Final Safety Analysis Report. **Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto – Unidade 2**. Rev.11. Eletronuclear - Eletrobras Termonuclear S.A., 2010.

GONÇALVES JUNIOR, M. A. **Aplicação da fluidodinâmica computacional à dispersão atmosférica de radionuclídeos na vizinhança de uma central nuclear**. Dissertação de Mestrado, IEN/CNEN, Rio de Janeiro, 2006.

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.

IAEA, International Atomic Energy Agency. **Generic Models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment**. Safety Report Series, 19, Vienna, 216p, 2001.

IAEA, International Atomic Energy Agency. **Dispersion of Radioactive Material in Air and Water and Consideration of Population Distribution in Site Evaluation for Nuclear Power Plants**. Safety Standards Series NS-G-3.2, Vienna, 32p, 2002.

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.

MAHIQUES, M.M. & Furtado, V.V. **“Utilização da análise dos componentes principais na caracterização dos sedimentos de superfície e de fundo da Baía de Ilha Grande (RJ)”**, Bol. Inst. Oceanográfico da USP, 37(1), pp. 1-19, 1989.

NATRONTEC. **Estudo de Impacto Ambiental (EIA) para a Usina Nuclear de Angra 2**, Volumes, 1, 2, 3 e 5, 1998.

NATRONTEC. **Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para a Usina Nuclear de Angra 2**, 1998.

NATRONTEC ESTUDOS E ENGENHARIA DE PROCESSOS LTDA. **Estudo de Impacto Ambiental da Unidade 2 Da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto – Angra 2**. Rio de Janeiro, 1999A. 8V.

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>

NYFFELER, F., Cigna A.A., Dahlaard, H., and Livingston, H.D. **“Radionuclides in the Atlantic ocean: A survey”**. In: Guéguéniat, P., Germain, P. and Métivier, H. (eds), *Radionuclides in the Oceans – Inputs and Inventories*, chapter 1, Les Editions de Physique, France, 1996.

ONISHI, Y. **Surface Water Transport of Radionuclides**. *In* Radiological Risk Assessment and Environmental Analysis. Till, J. E. and Grogan, H. A. (eds). Oxford University Press. pp147-207, 702p, 2008.

ROSMAN, P. C. C. **Desenvolvimento do modelo para o projeto BTS – relatório 02**. Relatório ET-170377, Fundação COPPETEC Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.

ROSMAN, P. C. C. **Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental**. In: ROSMAN, P. C. C., MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G. et al., *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos* 5, 1 ed., capítulo 1, Rio de Janeiro, RJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001.

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

SILVA, Ferreira da 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.

SOARES, Abner Duarte. **Modelagem da dispersão de trício a partir de liberações acidentais postuladas de centrais nucleares.** Dissertação de Mestrado, IEN/CNEN, Rio de Janeiro, 2010.

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

TODREAS, Neil E. & Kazimi, Mujid S. **Nuclear Systems I. Thermal Hydraulic Fundamentals.** Massachusetts Institute of Technology, 1990

VARGAS, B.M., FREIRE, P.C.S., ACCETTA, D., UHRENHOLDT, T. E AMORIM, J.C.C. **Estudos de Circulação d'Água e de Dispersão de Poluentes no Complexo Lagunar Sul de Santa Catarina.** In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Aracaju- SE, 2001.

WEAST, R. C. **Handbook of Chemistry and Physics.** 50 ed.p. F145, CRC, Cranwood Parkway, 1970.