

Modelagem numérica do comportamento das ondas na costa do Rio Grande do Sul

**Débora Cuchiara¹, Elisa Helena Fernandes¹, João Carlos Strauch¹,
Lauro Júlio Calliari²**

¹*Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Departamento de Física, Laboratório de Oceanografia Física, Campus Carreiros, CEP: 96201-900, Rio Grande - RS – Brasil,
Fone: +55(53)3233-6643, Fax: +55(53)3233-6652*

dmtdc@furg.br, dfsehf@furg.br, dfsjcss@furg.br

²*Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Departamento de Geociências, Laboratório de Oceanografia Geológica, Campus Carreiros, CEP: 96201-900, Rio Grande - RS – Brasil,
Fone: +55(53)32326605, tsclauro@furg.br*

RESUMO

O presente trabalho apresenta simulações preliminares realizadas no estudo de caso de geração e propagação de ondas geradas pelo vento na costa do Rio Grande do Sul através da utilização de modelagem numérica. O comportamento do modelo de ondas SWAN foi avaliado sob a influência de diferentes condições de contorno (vento e altura significativa, período de pico, e direção da onda). Os resultados do modelo foram comparados com dados de um ondógrafo direcional, com aquisição de dados digital, fundeado nas proximidades do molhe leste da barra do Porto de Rio Grande. As comparações foram realizadas em termos de altura significativa, período de pico, direção média e densidade de energia. Os resultados obtidos mostraram que o modelo apresentou um bom desempenho na representação dos casos estudados.

PALAVRAS-CHAVE: ondas, modelagem numérica, SWAN

1. INTRODUÇÃO

A importância das zonas costeiras é há muito tempo reconhecido, não apenas pela comunidade científica, mas também por populações litorâneas. Esses ecossistemas apresentam privilegiados recursos naturais, econômicos e humanos, e atuam como áreas de interface crítica entre o oceano e os continentes, desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento destas populações. Em especial, as atividades turísticas, de recreação, e de comércio têm sido suporte econômico de um número crescente de comunidades.

A evolução morfológica desses sistemas pode ser consequência de intervenções humanas na zona costeira (obras de engenharia, dragagens, uso inadequado do solo, etc), gerando variações nos padrões de dispersão e transporte de sedimentos. Desta forma, conhecer e entender os efeitos das variações nas condições energéticas (oceanográficas e meteorológicas) da zona costeira no presente e no passado, bem como fazer projeções para o futuro, é essencial para a maioria dos projetos de engenharia, sendo um requisito básico para o gerenciamento costeiro. Trabalhos já realizados no litoral do Brasil mostram que a origem, desenvolvimento e desaparecimento de feições morfológicas da costa foram estudados a partir dos processos físicos que controlam sua dinâmica, envolvendo uma interação entre as ondas, as correntes, as marés e a topografia da plataforma continental. CERC [4] Morton [12]

Toda e qualquer estrutura costeira está sujeita a ação da agitação marítima provocada pelas ondas de gravidade podendo afetar vários setores, abrangendo desde atividades esportivas, navais e portuárias realizadas nas proximidades da costa, até atividades realizadas em regiões

II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, NOV/2006, Rio Grande, pp 15 (publicado em CD sem paginação)

profundas. Conseqüentemente, as ondas representam uma ameaça às obras marítimas, à segurança da navegação e às operações navais, como por exemplo, a exploração e transporte de petróleo.

A costa do Rio Grande do Sul (RS) ao longo de aproximadamente 610 km, apresenta uma orientação geral Nordeste-Sudoeste, caracterizada por praias arenosas retilíneas contínuas, amplamente exposta à ação das ondas devido ao seu caráter aberto. Apresenta uma batimetria bastante complexa, fato que influencia os processos físicos que determinam as características das ondas e o transporte de sedimentos na costa. Entretanto, a carência de dados observacionais relativos ao clima de ondas existentes na literatura, com base em dados pretéritos é uma realidade ao longo de toda a costa do Brasil, e em especial no Rio Grande do Sul Cuchiara [7], o que confirma a necessidade da aplicação de metodologias alternativas. Dentro deste contexto, é fundamental desenvolver e aprimorar ferramentas através das quais seja possível a previsão e o entendimento do comportamento das ondas.

Resultantes da ação do vento sobre a superfície dos oceanos, as ondas encontram-se intimamente associadas às variações dos regimes atmosféricos, possuindo grande variabilidade espacial e temporal. Uma vez geradas, as ondas adquirem “vida própria” tornando-se capazes de se propagar, e transportando através do oceano a energia que o vento lhes passou. Melo Filho [10]. É preciso, entretanto, pensar nas ondas como um meio de transporte de energia sob diferentes formas, que se observa desde sua geração a partir do vento agindo na superfície do oceano profundo, até sua propagação para a zona costeira.

As ondas existentes próximo a costa ou em mar aberto podem ser classificadas como “sea” ou “swell”. Sea são ondas que ainda estão na zona de geração, sendo capazes de receber energia do vento. O swell é composto por ondas que se propagaram para fora da zona de geração e não são mais capazes de receber energia do vento.

Vários são os processos físicos que atuam sobre um campo de ondas superficiais do mar, quando este se propaga de águas profundas para a zona costeira, através de mecanismos que conservam, adicionam ou removem a energia do campo de ondas. Dentre os mecanismos que adicionam energia aos campos de onda, salienta-se o efeito dos ventos, que quando presentes adicionam energia. A dissipação de energia com o fundo (fricção, percolação e atenuação por viscosidade) são mecanismos que atuam de uma maneira a dissipar a energia transportada pelas ondas. Tornam-se importantes quando a plataforma costeira sobre o qual o campo de ondas se propaga tem característica como grande extensão, alta porosidade (fundo formado por seixos ou sedimentos de grande diâmetro granulométrico) ou é composto por sedimentos fluidizados (fundos lamosos). A quebra das ondas ocorre quando estas se tornam instáveis e quebram quando se aproximam de águas muito rasas, dissipando energia na forma de turbulência e trabalho contra a fricção do fundo, caracterizando desta forma um mecanismo que também remove energia das ondas. O efeito das interações não lineares entre as ondas que ocorrem pelo acoplamento não linear entre as componentes de onda resulta na transferência de energia de uma componente para outra, sendo uma forma de conservação de energia. Essas interações não lineares acontecem perto do pico do espectro de energia, quando o ganho de energia é maior que a dissipação, e é transferido para altas e baixas frequências. Na região do espectro próxima ao pico de energia, o ganho de energia é maior que a dissipação. A energia em excesso é transferida pelas interações não-lineares às altas e baixas frequências. Nas altas, a energia é dissipada, pois essas ondas possuem curto período e pequeno comprimento, o que leva a um aumento da esbeltez e ao encapelamento do mar (‘whitecapping’). A energia transferida para as baixas frequências leva ao crescimento de novas componentes de onda no espectro, resultando numa migração do pico de energia nessa direção WMO [18].

Até a década de 40, o único modo de descrever o estado do mar relacionando a intensidade do vento com a força do mar era utilizando a escala de Beaufort, criada em 1805. WMO [18]

A primeira tentativa de desenvolvimento de um modelo de previsão de ondas surgiu na década de 50, baseado no princípio de conservação de energia. A partir daí vêm sendo desenvolvidos modelos com a finalidade de prever a propagação das ondas desde a zona de geração até as regiões costeiras, podendo-se estudar eventos passados, simulando-os com dados atmosféricos pretéritos (hindcasting), como prever situações futuras, forçando os modelos com condições previstas por análises e previsões (forecasting). Com o avanço da física dos modelos de geração e propagação de onda, seus resultados ficaram cada vez mais dependentes das condições de contorno utilizadas nas simulações, principalmente do campo de vento que atua como principal “forçante” para esses modelos. A implementação de um modelo de ondas utilizando condições de contorno que melhor representem os fenômenos atmosféricos caracteriza-se como uma ferramenta de simulação bastante importante para o estudo da física das ondas.

Portanto, o conhecimento do clima de ondas de uma região e a capacidade de previsão do estado de agitação marítima é de fundamental importância para todas as atividades ligadas ao oceano.

2. OBJETIVOS

Avaliar o comportamento do modelo de ondas SWAN sob a influência de diferentes condições de contorno (vento e altura significativa, período de pico, e direção da onda) de forma a obter a melhor representação das condições de mar que ocorrem na costa do Rio Grande do Sul.

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de interesse deste trabalho compreende toda a costa do Rio Grande do Sul, embora o enfoque principal esteja localizado entre 30° - $32^{\circ}15'$ S e $50^{\circ}30'$ - $52^{\circ}15'$ W. (Figura 1)

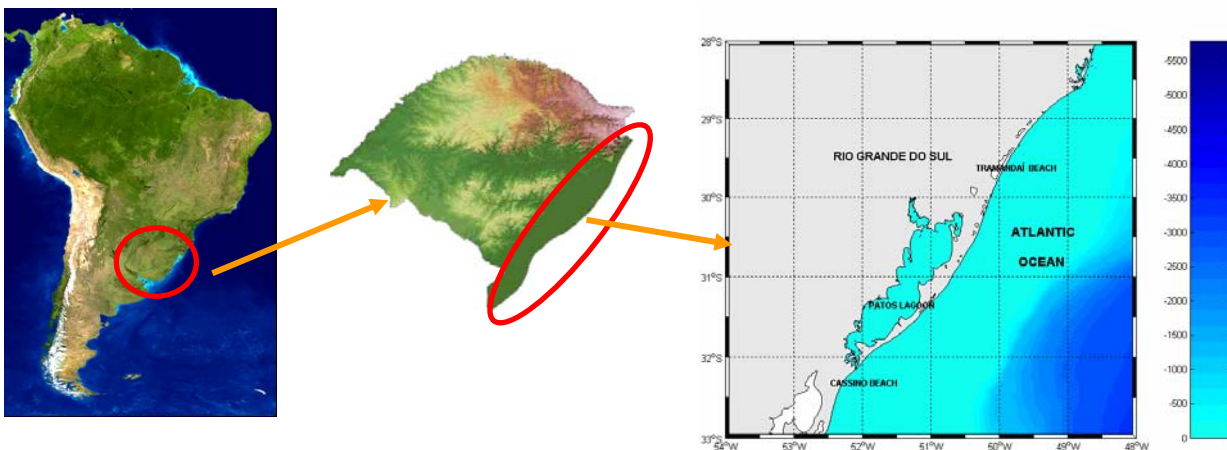


Figure 1 –Área de estudo.

3.1. Caracterização do clima de ondas:

Dentre os poucos estudos realizados sobre o clima de ondas para toda a costa do Rio Grande do Sul existem trabalhos com diferentes fontes de dados sobre as ondas, desde a utilização de ondógrafos, observações em campo, dados históricos em navios de oportunidade e sensores remotos.

Os únicos dados obtidos através de medições para esta região resultam de duas campanhas realizadas em Tramandaí Motta [13], e em Rio Grande Strauch [14] utilizando ondógrafos fundeados em águas rasas. Motta [13] determinou a altura máxima de onda em Tramandaí em função de dados obtidos entre outubro de 1962 e setembro de 1963 (12 meses de dados),

**II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, NOV/2006, Rio Grande, pp 15
(publicado em CD sem paginação)**

utilizando um ondógrafo não direcional, fundeado a 17,5 m de profundidade. A altura máxima observada foi de 7,0 m em abril de 1963, já o valor máximo da altura significativa foi de 4,8 m, ambas para um período de retorno de 30 anos. Para um período de retorno de 100 anos, tem-se altura máxima de 7,6 m e a altura significativa máxima de 5,5 m. A direção de incidência das ondas foi adquirida visualmente indicando que, no local de observação, as cristas são praticamente paralelas à costa.

Strauch [14] realizou um trabalho com o objetivo de fornecer informações preliminares sobre as características da agitação local e a determinação da onda de projeto, para dar suporte ao projeto de recuperação dos Molhes da Barra de Rio Grande. Para isso foi fundeado um ondógrafo direcional do tipo Waverider, com aquisição digital do sinal, na isóbata de 15 m. Os dados obtidos mostraram altura significativa média de 1,0 m na direção 100° SE, correspondendo a um estado do mar do tipo swell, e altura significativa média de 1,5 m na direção 160° SE, correspondendo a mar do tipo sea (Figura 2). Nesta direção foram observados os maiores picos de energia de ondas. Ainda foram observados em abril de 1998 os valores máximos de altura significativa alcançando 4,2 m, com direção de propagação de 140°. (Figura 3)

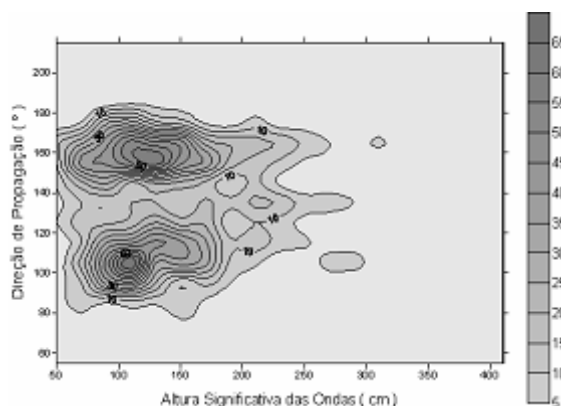


Figura 2 – Frequência de ocorrência – Altura significativa das ondas e direção de propagação.



Figure 3 – Altura significativa máxima (abril de 1998)

Colli [5] combinou a análise de dados de altura e direção de ondas obtidos através de navios de oportunidade (entre 1946 e 1979), com dados altimétricos do satélite Topex/Poseidon (ano de 1993), e determinou a variação espacial e temporal na altura e direção das ondas na região costeira e oceânica do Rio Grande do Sul. Seus resultados mostram que as ondas de inverno são maiores que as de verão. As ondas de nordeste, leste e sudeste possuem maior ocorrência na primavera e verão, enquanto que as de norte, oeste e sudoeste se amplificam no outono e inverno. Os valores mais expressivos de altura média correspondem à direção sudoeste e, secundariamente as direções sul, oeste e norte. Quanto à média anual para cada um dos quadrantes de direção de propagação das ondas, os dados demonstraram uma grande diversidade nas direções, possuindo como ocorrência principal ondas provenientes de nordeste, seguidas pelas ondulações de sul. Através da análise dos

II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, NOV/2006, Rio Grande, pp 15 (publicado em CD sem paginação)

dados do satélite Topex/Poseidon, foi possível averiguar que na porção oceânica sul da área de estudo predomina as maiores ondas em relação à porção norte da mesma. Abaixo da latitude de 33°S, os mapas históricos demonstram a permanência de núcleos de maiores alturas de ondas, os quais aumentam espacialmente e se intensificam no outono, atingindo um máximo no inverno.

Coli [6] descreveu o clima de ondas de superfície para a região próxima aos Molhes da Barra de Rio Grande, com base em um arquivo histórico (1949 e 1979) composto por ondas estimadas visualmente a partir de navios de oportunidade, e dados de onda adquiridos por um ondógrafo direcional entre outubro de 1996 e agosto de 1997. A partir destes dados foi realizada uma estatística de curto e longo prazo. O autor concluiu que a onda característica de curto prazo teve altura significativa entre 1,0 e 1,5 m, período médio entre 5 e 6 s e direção predominante sudeste. Não foram encontradas alturas significativas de ondas maiores que 4 m e não houve período médio maior do que 12 s nos registros do arquivo instrumental. Embora os parâmetros de altura e período não tenham apresentado variações significativas entre as estações do ano, foram encontradas diferenças na forma do espectro da onda. Nos meses de verão a posição do pico espectral foi mais freqüente na porção das vagas (8 a 10 s), enquanto que no inverno esteve nos períodos característicos de ondulação (10 a 14 s).

Machado [10] estimou a altura de ondas para um determinado tempo de recorrência, com dados coletados na região sul da Praia do Cassino (RS). O objetivo principal deste trabalho foi determinar a onda de projeto máxima para períodos de retorno de 1, 10, 20, 30,50 e 100 anos, visando fornecer subsídios para futuros trabalhos de engenharia costeira. O autor concluiu que as ondas em Rio grande apresentam dois regimes distintos. O primeiro corresponde a ondas locais ou vagas, com direção predominante SE, em torno de 100°, e o segundo também com direção predominante SE, mas em torno de 140°, correspondendo a ondas provenientes de tempestade ou swell. A maior onda significativa medida durante o período foi de 5,5 m e a onda máxima registrada foi de 7,6 m. A altura média significativa de 1,2 m e máxima de 2,0 m.

Araújo [1], descreveram o clima de ondas para a costa da região sul do Brasil utilizando uma série temporal de um ano completo de dados medidos por um ondógrafo direcional Datawell Waverider Mark II, fundeado a 35 Km ao largo da praia da Armação em 80 metros de profundidade na costa de Santa Catarina. Foi aplicado um novo enfoque usando técnicas estatísticas de análise de clusters para alcançar um melhor entendimento do regime de ondas na costa sul-brasileira. Nesta avaliação inicial, estes autores reportam uma freqüente configuração bimodal de mares sea-swell. Por isso, implementaram um procedimento de identificação para espectros de ondas multimodais do mar, revelando que 31% de espectros apresentaram dois picos, ocorrendo principalmente no verão (43%) e menos no inverno (24%), o que mostra uma variação sazonal. Com uma análise de histogramas bivariados, os autores mostraram a existência de swell do quadrante sul com 12 segundos de período e um mar sea com 8 segundos, ambos bem definidos. Durante o Outono e o inverno, a condição de swell prevalece sobre mares sea. No verão há um balanço entre estes dois estados e na primavera mares sea prevalecem sobre swell. A partir de informações normalizadas do período e direção de pico usado nesta análise de clusters, os autores mostram cinco grupos de mares com estruturas distintas ao longo do ano. Denominado pelos autores de sistema A, formado por swell longo de sudeste com período de pico médio de 14.2s e direção média de 146°, correspondente a ondulações distantes geradas em altas latitudes do Oceano Atlântico Sul. O sistema B com swell de sul (11,4s) com 162° referente a ondas geradas ao largo da costa do Rio Grande do Sul e Uruguai por ventos do quadrante sul que ocorrem após a passagem de frentes frias pela região. Um sistema C de mar sea de leste (8,5s) com direção 92°, representando um sistema de ondas estável associado com ventos de nordeste do sistema de alta-pressão semi-permanente do Atlântico Sul. Sistema D formado com mar sea de

II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, NOV/2006, Rio Grande, pp 15 (publicado em CD sem paginação)

nordeste de curto período (4,7s) e direção 27°, relacionado com ventos do quadrante norte e nordeste de menor duração de tempo que ocorrem logo antes da chegada de uma frente fria. E um Sistema E composto por mar sea de sul (6,4s) associado a ventos de sul que sopram logo após a passagem dos sistemas frontais. Durante a primavera, este sistema mostra um padrão mais complexo, dividido em dois sistemas pela análise estatística, um com período de 8,5s (chamado de sistema F) e outro curto com 5,1s. Estes autores também mostram que estes sistemas podem ocorrer simultaneamente. Fortes associações ocorrem entre o sistema A e C no verão e inverno, mas valores significantes continuam a acontecer nas estações intermediárias. O swell de sul (B) também mostra fortes associações com o estável mar de leste (C) nas estações mais quentes (primavera e verão). Nas estações mais frias, o sistema B é mais comumente associado com mares pré-frontais (D). Sistemas de onda B também mostram significantes ligações com swell longo de sul (A) no inverno, e com mares pós-frontais (E) no Outono.

3.2. Caracterização do clima de vento:

A origem dos ventos regionais que afetam a costa do Rio grande do sul relaciona-se, basicamente, com os dois sistemas de alta pressão que atuam nesta região: o Anticiclone do Atlântico Sul e o Anticiclone Migratório Polar.

Tomazelli[15], estabeleceu o regime de ventos na costa do Rio Grande do Sul a partir de dados registrados em três estações meteorológicas localizadas nas cidades litorâneas de Torres, Imbé e Rio Grande. Os dados de velocidade (m/s) e direção de proveniência (8 setores direcionais) dos ventos superficiais foram analisados em cima de uma série de dados de 13 anos: de janeiro de 1970 a dezembro de 1982. Com base na classificação de Fryberger [8], o regime de ventos na costa do Rio Grande do Sul, caracteriza-se como um regime de alta energia. Quanto a variabilidade direcional, apresenta um padrão bimodal obtuso na distribuição, devido a ação de ventos praticamente opostos. A análise destes dados mostrou claramente que, nas três estações meteorológicas, os ventos mais frequentes provem de nordeste (NE) e, embora sobre ao longo de todo o ano, é mais ativo nos meses de primavera-verão. O vento oeste (O)-sudoeste (SO), secundário, é mais eficaz nos meses de inverno os quais apresentam como ventos de segunda predominância para Torres, Imbé e Rio Grande respectivamente os ventos de Sul (S), Oeste (O) e sudoeste (SO).

Krusche [9] calculando as normais climatológicas provisórias para Rio Grande entre 1991 e 2000 encontraram também o vento nordeste (NE) como predominante, tendo, porém determinado o SE como vento secundário.

Calliari [2] com a proposta de verificar a atual variabilidade regional das dunas frontais quanto as suas características fisiográficas e sua altura ao longo do litoral norte e médio do RS, relacionou a orientação da linha de costa com o vento predominante, as características morfodinâmica das praias e a ocorrência e distribuição de sangradouros. Para consubstanciar este trabalho os dados usados sobre frequência, direção e intensidade do vento foram obtidos de Tomazelli [14] e do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul [4], criado a partir de medições realizadas através de anemômetros e dados de reanálise (NCAR), para um período representativo de quinze anos. De acordo com o diagrama da rosa dos ventos do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul Camargo [4], as estações mais ao norte apresentam ventos nordeste (NE) –leste (L) com maior frequência e intensidade. De Mostardas para o Sul a frequência e intensidade dos ventos de nordeste (NE) são reduzidas notando-se um aumento regional das componentes de sudeste (SE) e sul (S). (Figura 4)

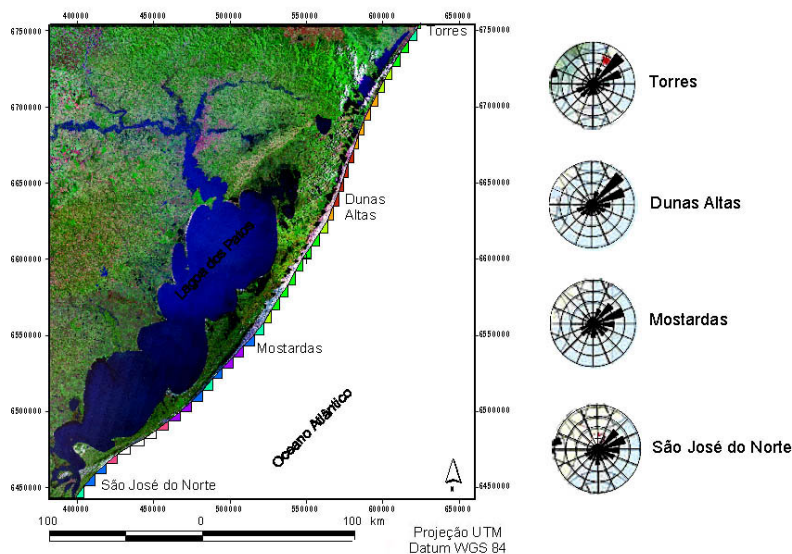


Figura 4 – Frequência e intensidade dos ventos no litoral norte e médio, de acordo com Atlas Eólico do RS.

4. METODOLOGIA

4.1. Dados

Os dados de batimetria para a area estudada foram obtidos baseados nas cartas náuticas brasileiras (Diretoria de Hidrografia e Navegação da marinha do Brasil- DHN). As cartas náuticas foram digitalizadas usando o software Surfer 8 e cada ponto batimetrico foi georeferenciado em coordenadas UTM, fornecido pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Brasil.

Os dados disponíveis são mostrados na Tabela 1, e as estações estão localizadas na Figura 5.

Tabela 1 – Tabela de dados disponíveis.

<i>Parametros</i>	<i>Estações</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Início</i>	<i>Fim</i>
Data 1996				
<i>Ondas</i>	Molhe leste	3 horas	11-10-1996	31-12-1996
Data 1997				
<i>Vento</i>	Estação Praticagem	3 horas	01-08-1997	31-12-1997
<i>Onda</i>	Molhe leste	3 horas	01-01-1997	31-08-1997
Data 1998				
<i>Vento</i>	Estação Praticagem	1 hora	28-01-1998	31-12-1998
<i>Vento</i>	Estação Praticagem	1 hora	01-01-1998	30-04-1998
<i>Onda</i>	Molhe leste	3 horas	01-01-1998	30-04-1998
Data 1999				
<i>Vento</i>	Estação Praticagem	1 hora	01-01-1999	31-12-1999
Data 2000				
<i>Vento</i>	Estação Praticagem	1 hora	01-01-2000	31-12-2000
Data 2001				
<i>Vento</i>	Estação Praticagem	1 hora	01-01-2001	22-09-2000

Uma serie de dados horários de velocidade e direção de ventos medidos na estação da Praticagem (Figura 5) relativo a fevereiro de 1998 foi prescrito como condição de contorno

**II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, NOV/2006, Rio Grande, pp 15
(publicado em CD sem paginação)**

em toda a superfície do domínio. Neste trabalho foi usado vento constante no tempo e no espaço. (Figura 6)

Os dados de onda utilizados para calibração do modelo foram relativos ao mês de fevereiro de 1998 (Figura 7) e foram obtidos de um ondógrafo direcional, com aquisição de dados digital, fundeado nas proximidades do molhe leste da barra do Porto de Rio Grande, 32°10'002"S e 51°58'913" W (perto da boca do estuário da lagoa dos Patos) e fixado a 15m de profundidade. (Figura 5)

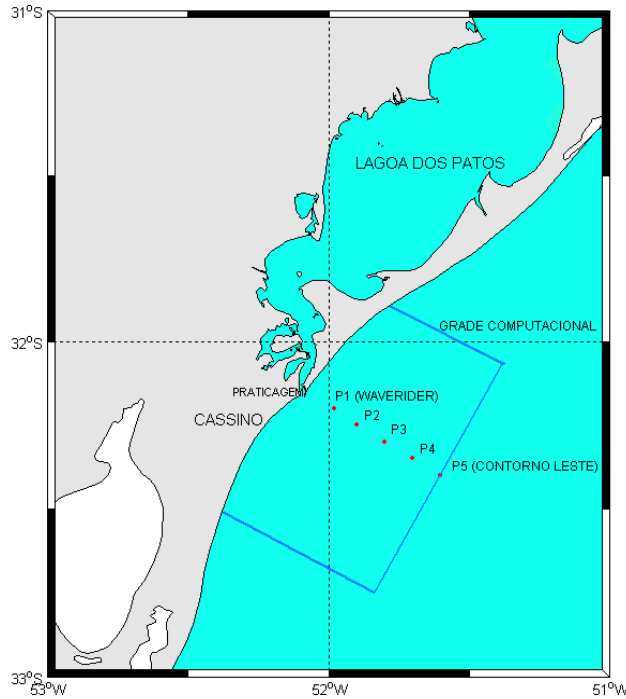


Figura 5 – Localização dos pontos de aquisição de dados e parâmetros de saída do modelo.

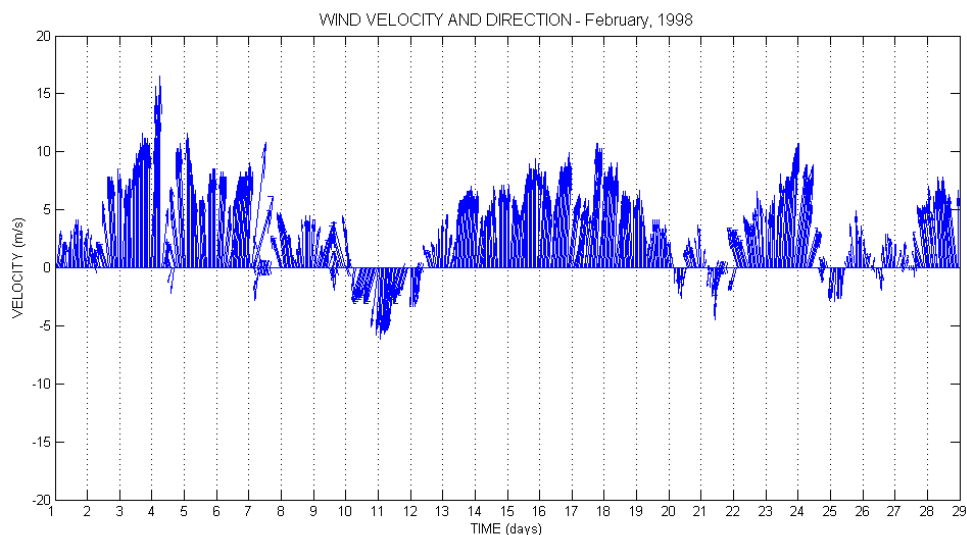


Figura 6- Serie de dados horários de velocidade e direção de ventos medidos na estação da Praticagem relativo a fevereiro de 1998.

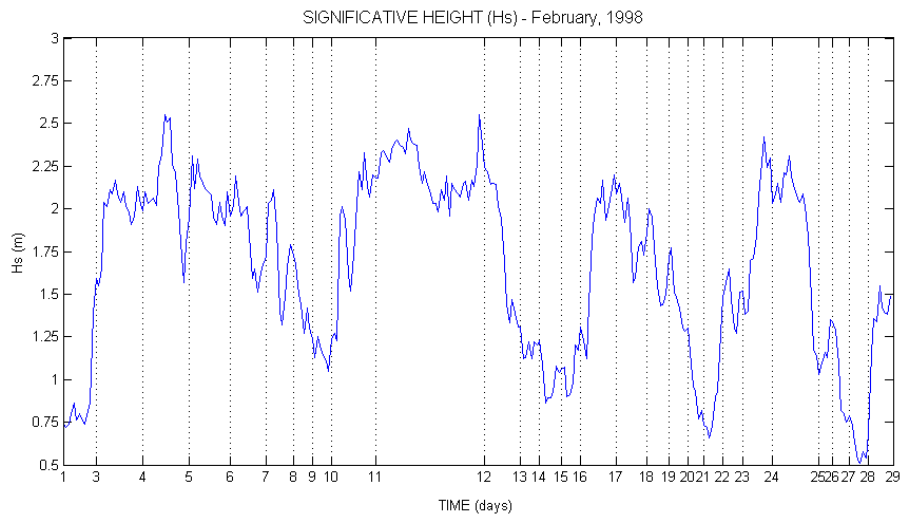


Figura 7 - Altura Significativa das ondas obtidas de um ondógrafo direcional, fundeado nas proximidades do molhe leste da barra do Porto de Rio Grande relativo a fevereiro de 1998.

4.2. Grade Numérica

O modelo SWAN foi aplicado na área estudada apresentada na Figura 7, que cobre uma área costeira de aproximadamente 100 km e se estende cerca de 50 km em direção ao oceano na costa do Rio Grande do Sul, incluindo a praia do Cassino. A profundidade da costa para o oceano varia entre 1 a 29 m.

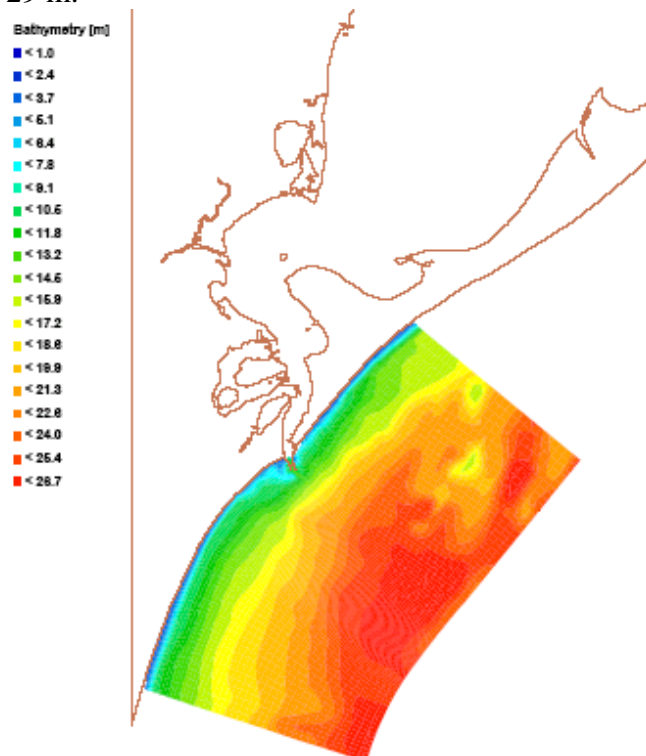


Figura 7 – Área estudada e distribuição da profundidade.

O modelo de ondas usa uma grade curvilínea composta de 41 por 104 pontos, com aproximadamente 4264 pontos ativos. (Figura 8) As dimensões das células do gride variam entre 1.5 km próximo aos contornos e 1.0 km perto dos molhes e da praia do Cassino.

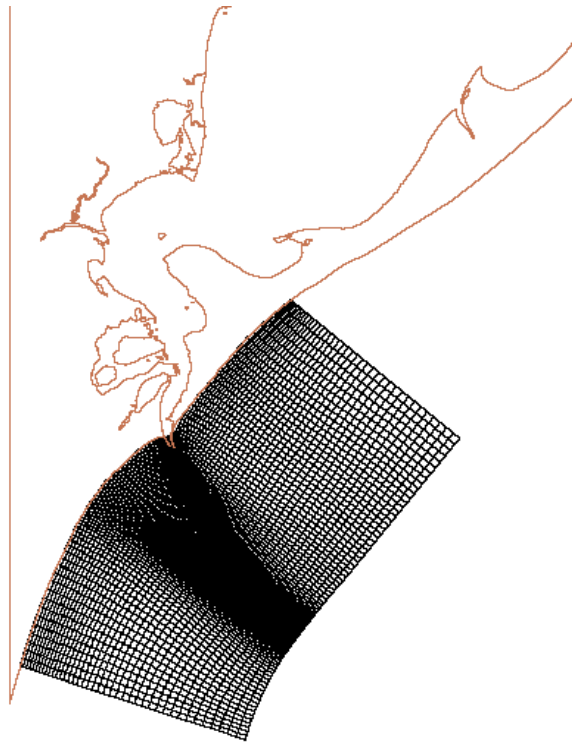


Figure 8 – Gride computacional curvilinear utilizado nos experimentos numéricos.

4.3. Modelo de ondas SWAN

O modelo SWAN, modulo de ondas do modelo Delft3D, desenvolvido pela Universidade de Delft, é um modelo de ondas de terceira geração, desenvolvido pela Universidade de Delft Booij [19] Zijlema [17], que calcula a propagação espectral da agitação marítima, sendo projetado para obter uma estimativa realista dos parâmetros de agitação marítima em regiões costeiras e estuários. Partindo do conhecimento das condições de vento, batimetria e correntes na área em estudo, o modelo resolve a equação de conservação do movimento na forma espectral e permite calcular a evolução do espectro direcional e respectivos momentos estatísticos. Os processos de propagação de onda representados no SWAN são: bloqueio e reflexão devido a correntes opostas e obstáculos, refração e shoaling devido a variação espacial de correntes e no fundo. Os processos de geração de onda são representados pelo efeito do vento. Os processos de dissipação são representados por whitecapping, quebra de ondas induzida pelo fundo, fricção com o fundo e interações não lineares triplas e quádruplos.

Neste trabalho o modelo de ondas SWAN foi calibrado baseado na comparação entre os resultados do modelo e os dados de onda medidos existentes na bibliografia. O modelo foi forçado com uma serie de temporal de velocidade e direção de ventos medidos na estação da Praticagem (Figura 5). Para avaliar o comportamento do SWAN os resultados do modelo foram comparados com dados de um ondógrafo direcional, com aquisição de dados digital, fundeado nas proximidades do molhe leste da barra do Porto de Rio Grande, próximo da boca do estuário da lagoa dos Patos, fixado a uma profundidade de 15 m.. As comparações foram realizadas em termos de altura significativa, período de pico, direção média e densidade de energia.

A seleção de casos significativos para os experimentos com o modelo de ondas SWAN foi baseado na caracterização do estado do mar encontrado na literatura para a área estudada. Dois tipos de ondas oceânicas geradas pelo vento foram selecionados: condições de sea e de swell. Dados de ondas baseados em Strauch [14] mostraram a predominância de swell de sul, com período de pico de 12 segundos e condições de sea com período de pico de 8s. O

**II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, NOV/2006, Rio Grande, pp 15
(publicado em CD sem paginação)**

trabalho apresentado por Tomazelli [15] mostra a predominância de ventos na área estudada vindo de nordeste (NE) e de sudoeste (SW).

Foram selecionados dois dias do mês de fevereiro correspondendo a diferentes direções de vento, onde o waverider registrou dados representativos de dois estados característicos do mar. A Tabela 2 apresenta as condições de onda de swell observada no ponto de localização do waverider e a velocidade e direção do vento para três horários diferentes no dia 11 de fevereiro de 1998. A Tabela 3 apresenta as condições de onda de sea observada no ponto de localização do waverider e a velocidade e direção do vento para três horários diferentes no dia 4 de fevereiro de 1998.

Tabela 2 – Condições de onda de swell observada no ponto de localização do waverider e a velocidade e direção do vento para três horários diferentes no dia 11 de fevereiro de 1998

11/2/1998	Condições de onda de swell observada					Vento medido		
	Hs (m)	Tm01 (s)	Tp (s)	NDIR(graus)	DSPR(degree)	V (m/s)	DIR(graus)	
09:00	2,14	4,9	13,3	160	16,7	8,08	225,0	SW
17:00	2,17	5,3	13,3	166	18,9	7,15	202,5	SSW
22:00	1,94	5,7	12,5	166	13,2	4,48	180,0	S

Tabela 3 – Condições de onda de sea observada no ponto de localização do waverider e a velocidade e direção do vento para três horários diferentes no dia 4 de fevereiro de 1998.

4/2/1998	Condições de onda de sea observada					Vento medido		
	Hs (m)	Tm01 (s)	Tp (s)	NDIR(graus)	DSPR(degree)	V (m/s)	DIR(graus)	
01:00	2,05	4,7	7,1	108	29,7	11,2	67,5	ENE
04:00	2,51	5,2	7,1	104	23,4	13,4	90	E
07:00	1,80	5,5	8,3	104	19,4	7,2	45	NE

Foram escolhidos para saída do modelo pontos localizados na mesma direção entre a localização do waverider e contorno leste do gride computacional. As localizações destes parâmetros de saída do modelo estão apresentadas na Figura 5.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 4 – Comparação dos resultados da altura significativa (Hs) obtida com o modelo comparado com os dados observados para duas situações representativas do mar, swell e sea.

Localização	Hs (m) Observada	Hs (m) Computada
Swell		
P1 (Waverider)	2,1	1,9
P2		2,1
P3		2,2
P4		2,3
P5 (contorno leste)		2,3
Sea		
P1 (Waverider)	2,0	1,8
P2		1,9
P3		2,0
P4		2,1
P5 (contorno leste)		2,1

Serão apresentados a seguir os resultados das simulações realizadas com o modelo de ondas SWAN, bem como uma análise nas diferentes formas de aplicação das condições de contorno nas simulações para o período estudado.

Um resumo dos resultados da altura significativa (H_s) obtida com o modelo comparado com os dados observados para duas situações representativas do mar swell e sea, está apresentado na Tabela 4. Observa-se que para a altura significativa (H_s) o modelo apresenta, nas duas simulações, uma boa correlação com os dados medidos.

Na figura 9 é apresentada a energia de densidade calculada pelo modelo comparada com o dado medido no ponto de localização do ondógrafo. Esta simulação é representativa de um estado do mar do tipo swell, onde foi utilizado para forçar o modelo um vento com velocidade de 8.08 m/s SW, e aplicado nos contornos abertos altura significativa da onda (H_s) de 2.1m e período de pico (T_p) de 12.5s, considerado constante ao longo dos contornos.

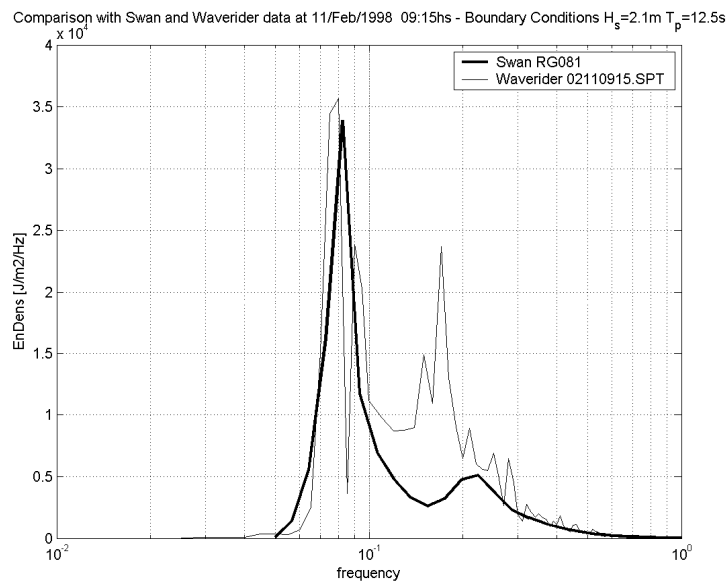


Figura 9 – Comparação entre o modelo SWAN e o dado medido pelo ondógrafo em 11/02/1998 às 09:15 horas –Condição de contorno $H_s=2.1m$ $T_p=12.5s$

A Figura 10 mostra a mesma simulação apresentada na Figura 9 com diferença na forma de aplicação das condições de contorno. Neste caso foi aplicado o espectro da onda em vários pontos dos contornos abertos.

Numa avaliação inicial, observa-se configuração bimodal de mares sea-swell no espectro medido pelo ondógrafo apresentando dois picos, um de swell e um de mar sea, ambos bem definidos. É possível identificar uma subestimação do modelo dos em relação à medição do ondógrafo na Figura 9, e uma superestimação do modelo na Figura 10, ambos no pico do espectro correspondente ao mar sea. O modelo representa melhor o espectro da densidade de energia quando é aplicado o espectro da onda em vários pontos do contorno. Os resultados obtidos para densidade de energia a partir do modelo SWAN em configuração bimodal do espectro indica que o processo de whitecapping consome uma energia não realística do swell.

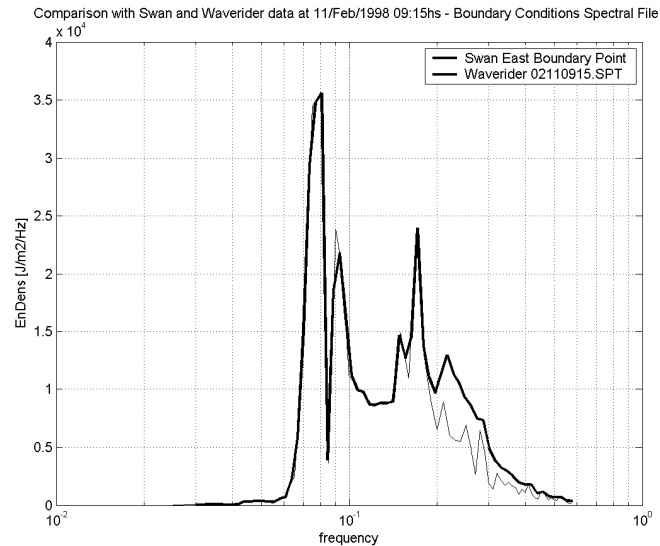


Figura 10 - Comparação entre o modelo SWAN e o dado medido pelo ondógrafo em 11/02/1998 as 09:15 horas –Condição de contorno espectro em vários pontos do contorno

A Figura 11 é representativa de um estado do mar do tipo sea, onde foi utilizado para forçar o modelo um vento com velocidade de 11.20 m/s ENE, e aplicado nos contornos abertos altura significativa da onda (H_s) de 2.0m e período de pico (T_p) de 6.3s, considerado constante ao longo dos contornos. Neste caso estudado o espectro medido pelo ondógrafo é unimodal. O modelo representa bem o espectro da densidade de energia correspondente a um mar de sea, pois esse tipo de onda é limitado somente pelo processo de whitecapping.

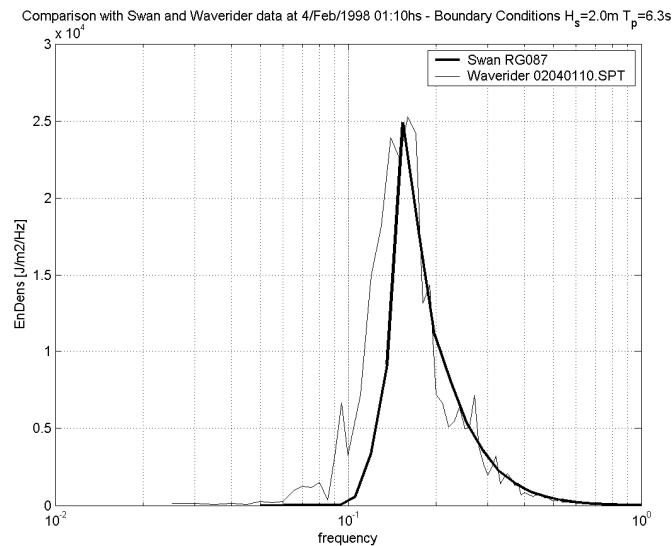


Figura 11 - Comparação entre o modelo SWAN e o dado medido pelo ondógrafo em 4/02/1998 as 01:10hs – Condição de contorno $H_s=2.0m$ $T_p=6.3s$

A Figura 12 é representativa da altura significativa e direção média obtida pelo SWAN para um estado do mar do tipo sea. Foi utilizado para forçar o modelo um vento com velocidade de 7.0 m/s NE, e aplicado nos contornos abertos altura significativa da onda (H_s) de 2.0m e período de pico (T_p) de 8.3s, considerado constante ao longo dos contornos.

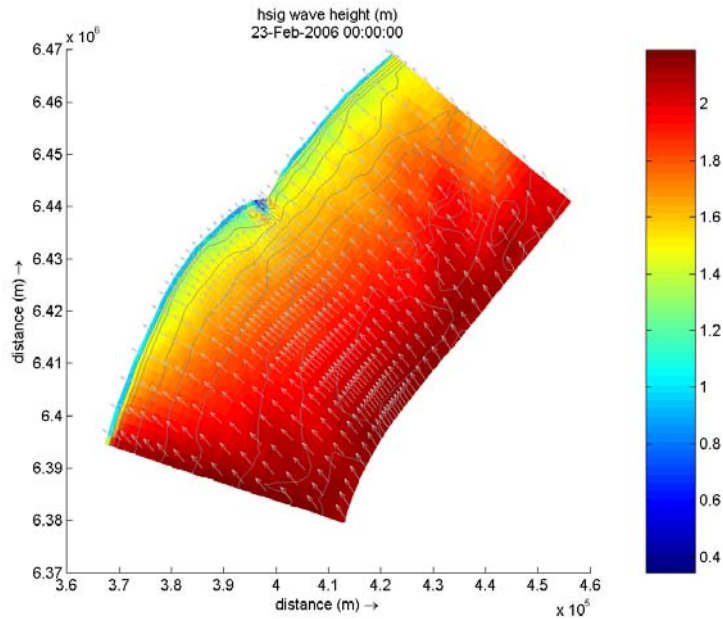


Figura 12 - Altura significativa e direção média obtida pelo SWAN em 4/02/1998 as 07:00hs

A Figura 13 apresenta a representação tridimensional do resultado obtido com o modelo da distribuição da energia, mostrando um espectro unimodal de mar tipo sea com direção principal em torno de 160° e período de pico de 8s.

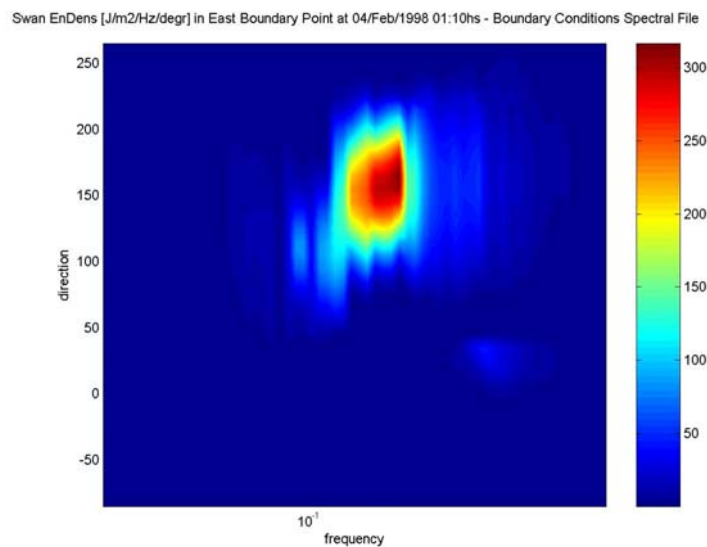


Figura 13 - Representação tridimensional da densidade de energia obtido pelo modelo SWAN em 4/02/1998 as 01:10hs

7. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostraram que o modelo apresentou um bom desempenho na representação dos casos estudados.

Como estudos futuros, sugere-se uma avaliação nos mesmos moldes utilizando outras bases de dados de vento como, com a finalidade de comparar a relação entre a qualidade dos resultados obtidos pelo modelo, com o tipo de vento usado para forçar o modelo.

8. REFERÊNCIAS

1. ARAUJO, C. E. S., FRANCO, D., MELO, E. e PIMENTA, F. M., (2003). Wave Regime Characteristics of the Southern Brazilian Coast, *Proc. COPEDEC VI*, Colombo, Sri Lanka; CD press.
2. CALLIARI, L. J. , PEREIRA, P. S. , DE OLIVEIRA, A. O., FIGUEIREDO, S. A. (2005). Variabilidade das Dunas Frontais no Litoral Norte e médio do Rio Grande Do Sul, Brasil. *GRAVEL*(no prelo)
3. CAMARGO, O. A., SILVA, F. J. L., CUSTODIO, R.S. e GRAVINO, N. (2002). *Atlas Eólico do Rio Grande do Sul*. Secretaria de Energia, Minas e Comunicações, Porto Alegre/RS. 70p.
4. CERC (Coastal Engineering Research Center), (1986). Measuring Shoreline Change. *U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Technical Note*, II-86, 7p.
5. COLI, A. B., 1994. Análise das alturas de onda ao longo do Rio Grande do Sul: dados históricos e altimétricos. *Trabalho de graduação*, Curso de Oceanologia, Fundação Universidade Federal do Rio Grande – FURG, 58p.
6. COLI, A. B., (2000). Estudo do Clima Ondulatório em Rio Grande. *Dissertação de Mestrado*, Curso de Engenharia Oceânica, Fundação Universidade Federal do Rio Grande – FURG, 76p.
7. CUCHIARA D. C., FERNANDES, E. H., STRAUCH, J. C., CALLIARI, L. J.(2005). Caracterização do clima de ondas na costa do Rio Grande do Sul. *Anais do VI Seminário sobre ondas, mares, engenharia oceânica e oceanografia por satélite*.(VI OMAR-SAT), resumo expandido. Arraial do Cabo, Rio de Janeiro, Brasil.
8. FRYBERGER, S. G. (1979). Dune forms and wind regime. In: McKee, E.D. (ed) *A Study of Global Sand Seas. Geological Survey Professional*, Paper 1052: 137-169.
9. KRUSCHE, N., SARAIVA, J.M.B. e REBOITA, M.S. (2003). Normais climatológicas provisórias de 1991 a 2000 para Rio Grande, RS. 104p.
10. MACHADO, D. M., (2000). Previsão de Eventos Extremos de Ondas para a Praia do Cassino, Rio Grande, RS. *Dissertação de Mestrado*, Curso de Engenharia Oceânica, Fundação Universidade Federal do Rio Grande – FURG, 76p.
11. MELO FILHO; ALVES, J. H. G. DE M. (1993), Nota sobre a chegada de ondulações longínquas á costa brasileira. *Anais do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (X ABRH)*, v.5, pp. 362-369, Gramado, RS, Brasil.
12. MORTON, R.A., (1991). Accurate shoreline mapping: past, present, and future. *Coastal Sediments '91*, 1, 997-1010.
13. MOTTA, V. F., (1963). Análise e Previsão das Alturas de Ondas em Tramandaí, Porto Alegre. *Instituto de Pesquisas Hidráulicas*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 30 p.
14. STRAUCH, J.C., (1998). Um Ano de Monitoramento de Ondas em Rio Grande. *XI Semana Nacional de Oceanografia*, Fundação Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Oceanografia e suas interfaces, resumos expandidos.
15. TOMAZELLI, L. J. (1992). O regime dos ventos e a taxa de migração das dunas eólicas costeiras do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas* 20(1): 18-26.
16. TOMAZELLI, L.J. e VILLWOCK, J.A. (1992). Considerações sobre o ambiente praiial e a deriva litorânea de sedimentos ao longo do litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas* 19(1): 3- 12.
17. ZIJLEMA, M. AND A.J. VAN DER WESTHUIJSEN, (2005), On convergence behaviour and numerical accuracy in stationary in stationary SWAN simulations of nearshore wind wave spectra, *Coastal Engineering*, 52, 237-265.
18. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, (1988), *Guide to Wave Analysis and Forecasting*, Pub. 702, Geneve, Switzerland,
19. **SWAN Cycle III version 40.41**, User Manual, 2004. 118 p.
20. **Atlas eólico** → <http://www.semc.rs.gov.br/>