



Universidade de Aveiro
2021

**THIAGO
GAVAZZONI**

**APLICAÇÃO DO MODELO WW3 NO ATLÂNTICO
NORTE COM ALTA RESOLUÇÃO NA REGIÃO DE
FIGUEIRA DA FOZ**



Universidade de Aveiro
2021

**THIAGO
GAVAZZONI**

**APLICAÇÃO DO MODELO WW3 NO ATLÂNTICO
NORTE COM ALTA RESOLUÇÃO NA REGIÃO DE
FIGUEIRA DA FOZ**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências do Mar e da Atmosfera, realizada sob a orientação científica do Doutor Paulo Manuel Cruz Alves da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro, e do Doutor Tiago Castro Alves Oliveira, Investigador Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho ao leitor.

o júri

presidente

Prof. Doutor José Manuel Henriques Castanheira
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

arguente

Doutor Alphonse Pascal David Nahon
Investigador, LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

orientador

Prof. Doutor Paulo Manuel Cruz Alves da Silva
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

agradecimentos

A Deus pela oportunidade de viver, estudar e me aperfeiçoar em uma área científica que eu amo.

Ao meu Anjo Guardião e aos Espíritos de Luz que me acompanham, guiam, protegem e instruem.

Aos meus pais: Carlos Gavazzoni e Nilza Teresinha Marchi Gavazzoni, que sempre me incentivaram e motivaram ao estudo. Ao meu irmão, Raphael Gavazzoni.

Aos meus orientadores: Professor Doutor Paulo Manuel Cruz Alves da Silva e Professor Doutor Tiago Castro Alves Oliveira, por todos os ensinamentos e auxílio que me deram.

Aos professores, amigos e colegas de curso, em especial Nuno Manuel Rocha Monteiro e Ricardo Jorge Vaz, por todo auxílio que me deram.

Ao surfe e a natureza, principais motivos que instigaram a estudar e me aperfeiçoar nas Ciências do Mar e da Atmosfera.

palavras-chave

Agitação marítima, grades aninhadas, boia ondógrafo, reanálises.

resumo

O modelo WW3 foi aplicado em um esquema de múltiplas grades. Foi utilizado três grades retilíneas aninhadas: uma grade global abrangendo o oceano Atlântico Norte, uma grade regional compreendendo Portugal e parte noroeste da Espanha, e uma grade local com alta resolução, detalhando a região da Figueira da Foz. Foram simulados pelo modelo os parâmetros Hs, Tp, Tm e Direção Média, e comparados com dados de boia ondógrafo e com dados de reanálises. Primeiramente as resoluções utilizadas foram 0.5° (grade global), 0.25° (grade regional) e 0.005° (grade local). A resolução da grade regional foi relativamente baixa em relação a grade local, fazendo com que a mesma estivesse inserida dentro da porção continental da grade regional, ocasionando zonas de obstrução. Este problema foi parcialmente resolvido quando se aumentou a resolução da grade regional para 0.0625° . Aumentou-se também a resolução da grade global para 0.25° e manteve-se 0.005° na grade local. Nas primeiras simulações o modelo apresentou instabilidade numérica, em especial quando sofreu influência da zona costeira. O modelo utiliza um filtro que suaviza a inclinação do fundo para alguns componentes de onda de baixas frequências, onde suprime a refração em casos de mudança repentina da topografia fundo. A baixa resolução batimétrica utilizada pelo modelo, pode ser uma das causas pelo qual este filtro não se mostrou eficiente ou o filtro da equação não suporta ondas com períodos muito altos. Desta forma, alcançou-se a estabilidade numérica diminuindo os intervalos de tempo, em especial o intervalo de tempo intra-espectral (que contabiliza a refração). Os parâmetros Hs, Tp, e Direção Média seguiram relativamente bem a tendência dos dados mensurados pela boia e dos dados de reanálises, apesar de Hs ter sido subestimado em relação aos dados da boia, o que é também retratado por diversos autores. Para o período médio (Tm), tanto os resultados simulados pelo modelo como os dados de reanálises, apesar de também seguirem a tendência da boia, não apresentaram resultados muito promissores, pois houve uma pronunciada superestimação em relação aos dados mensurados pela boia.

keywords

Wind-waves, nested grids, wave buoy, reanalysis.

abstract

The WW3 model was applied in a multiple grid scheme. Three nested rectilinear grids were used: a global grid covering the North Atlantic Ocean, a regional grid covering Portugal and northwestern Spain, and a local grid with high resolution detailing the region of Figueira da Foz. The parameters H_s , T_p , T_m and Mean Direction were simulated by the model and compared with data from wave buoy and with data from reanalysis. Firstly, the resolutions used were 0.5° (global grid), 0.25° (regional grid) and 0.005° (local grid). The resolution of the regional grid was relatively low in relation to the local grid, causing the local grid to be inserted within the continental portion of the regional grid, causing obstruction zones. This problem was partially solved by increasing the resolution of the regional grid to 0.0625° . The resolution of the global grid also was increased to 0.25° and kept 0.005° in the local grid. In the first simulations, the model showed numerical instability, especially when it was influenced by the coastal zone. The model uses a filter that smoothes the slope of the bottom for some low frequency wave components, where it suppresses refraction in cases of sudden change in the bottom topography. The low bathymetric resolution used by the model may be one of the reasons why this filter was not efficient, or the equation filter does not support waves with very high periods. In this way, numerical stability was achieved by decreasing the time steps, especially the intra-spectral time step (which accounts for the refraction). The parameters H_s , T_p , and Mean Direction followed the trend of the data measured by the wave buoy and data from reanalysis relatively well, although H_s was underestimated in relation to the data from the buoy, which is also portrayed by several authors. For the mean period (T_m), both the results, simulated by the model and the reanalysis data, despite also following the wave buoy trend, did not show very promising results, as there was a pronounced overestimation in relation to the data measured by the wave buoy.

Índice

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	iii
1. Introdução	1
2. Fundamentação Teórica sobre o modelo.....	4
2.1. Equações de Governo do Modelo	4
2.1.1. Propagação	5
2.1.2. Termos de Fonte	6
2.2. Aproximações Numéricas	7
2.2.1. Discretização Espectral	7
2.2.2. Fragmentação da Equação da Ação de Onda	8
2.2.3. Variações da Profundidade no Tempo	10
2.2.4. Propagação Espacial	10
2.2.5. Propagação Intra-espectral.....	12
2.2.6. Integração dos Termos de Fonte (sem gelo)	13
3. Metodologia e Recursos Utilizados	15
3.1. Execução do molelo	15
3.1.1. Pré-processo	15
3.1.2. Execução da Simulação	19
3.1.3. Pós-Processo	20
3.2. Validação / Calibração	21
4. Simulações Realizadas, Resultados e Discussão.....	22
4.1. Simulações Realizadas e Resultados Obtidos	22
4.2. Comparação de dados (validação/calibração)	32
5. Considerações Finais	46
6. Referências	48

Lista de Figuras

Figura 1. Aninhamento das grades global, regional e local. Sendo os limites de domínio da grade global: 70°N, -90°, 10°N e 0°, coordenadas em graus decimais.	16
Figura 2. Limites de domínio da grade regional (coordenadas em graus decimais), o quadrante menor representa a grade local aninhada na grade regional. A linha vermelha na extremidade direita da figura representa o limite mais a leste da grade global.....	17
Figura 3. Limites de domínio da grade local, coordenadas em graus decimais.	17
Figura 4. Exemplo do esquema para execução do modelo de grade única, extraído do trabalho de Cagnin et al. (2019).....	20
Figura 5. Exemplo do esquema para execução do modelo de múltiplas grades utilizado neste trabalho.	20
Figura 6. Resultados da simulação para Hs e direção média na grade Atlan, as datas nas partes superiores das figuras correspondem as datas e estão no formato: mês/dia/ano/hora.	23
Figura 7. Resultados da simulação para Hs e direção média de onda na grade Atlan (porção superior da figura) e Reg (porção inferior da figura) entre os dias 3 e 9 do mês de janeiro. ...	24
Figura 8. Instabilidade numérica na simulação da grade local.	25
Figura 9. Instabilidade numérica na simulação da grade local.	26
Figura 10. Hs e direção média na grade local (Loc) para alguns dias do mês de janeiro de 2018.	27
Figura 11. Obstrução na grade local causando uma zona de sombra.....	27
Figura 12. Grade local aninhada na grade regional.....	28
Figura 13. Grade local aninhada na grade regional: pontos em terra (0); pontos em água (1); pontos de fronteira com a grade aninhada (2); e pontos ignorados na computação (3).	28
Figura 14. Resultados da simulação para Hs e direção média de onda na grade Atlan (porção superior da figura), Reg (porção central da figura) e Loc (porção inferior da figura) entre os dias 5 e 17 do mês de janeiro.	30
Figura 15. Zona de sombra causada pela obstrução do cabo na grade local.	31
Figura 16. A esfera laranja representa a localização da boia Alfredo Ramalho, o quadrado representa a localização dos dados de reanálises e o triângulo representa o ponto selecionado na grade regional (Reg) do WW3, todos encontram-se dentro do domínio da grade regional e global, as coordenadas estão em graus decimais.	32
Figura 17. Ponto de análise no domínio da grade local (40°N e -9°W), coordenadas em graus decimais.....	33
Figura 18. Comparação de Hs na grade Atlan com diferentes resoluções.	34
Figura 19. Comparação de Hs na grade Reg com diferentes resoluções.	34
Figura 20. Comparação de Hs nas diferentes grades para o ano de 2018.....	35
Figura 21. Comparação de Hs nas diferentes grades para o ano de 2018.....	35

Figura 22. Scatter Plots de Hs, Tp, Tm e Direção Média entre os resultados simulados na grade Reg nas coordenadas (41°N e -9.5625°W) e os dados observados pela bóia Alfredo Ramalho.	36
Figura 23. Scatter Plots de Hs, Tp, Tm e Direção Média entre os resultados simulados na grade Loc nas coordenadas (40°N e -9°W) e os dados de reanálises nas mesmas coordenadas.....	37
Figura 24. Comparação de Hs da simulação na grade Reg com dados de reanálises e com a bóia Alfredo Ramalho.....	38
Figura 25. Comparação de Hs da simulação na grade Loc com os dados de reanálises.....	39
Figura 26. Comparação de Tp da simulação na grade Reg com dados de reanálises e com a bóia Alfredo Ramalho.....	40
Figura 27. Comparação de Tp da simulação na grade Loc com os dados de reanálises.....	41
Figura 28. Comparação do período médio de onda (Tm) na grade Reg, com dados de reanálises e com a bóia Alfredo Ramalho.	42
Figura 29. Comparação do período médio de onda (Tm) na grade Loc com os dados de reanálises.....	43
Figura 30. Comparação da direção média de onda nas diferentes grades.....	44
Figura 31. Comparação da direção média de onda na grade Reg, com a bóia Alfredo Ramalho e com os dados de reanálises.....	44
Figura 32. Comparação da direção média de onda na grade Loc com os dados de reanálises.....	45

Lista de Tabelas

Tabela 1. Indicadores estatísticos entre os resultados simulados na grade Reg nas coordenadas (41°N e -9.5625°W) com os dados observados pela bóia Alfredo Ramalho.....	36
Tabela 2. Indicadores estatísticos entre os resultados simulados na grade Loc nas coordenadas (40°N e -9°W) e dos dados de reanálises nas mesmas coordenadas.	37

1. Introdução

O movimento do ar sobre a superfície da água perturba o equilíbrio ali estabelecido pela gravidade produzindo ondas (Melo et al., 2008). A estimativa de alguns dos parâmetros de onda como altura significativa, período, direção etc. tem utilidades práticas tanto para previsões de agitação marítima, como para auxiliar projetos de engenharia oceânica, costeira e portuária.

Contudo, muitas vezes em mar aberto as informações necessárias, ou seja, uma rede suficientemente densa de dados medidos, estão faltando (Bertotti & Cavaleri, 2009). Além disso, a medição das ondas por boias oceanográficas são restritas a dados *in situ*, ademais, o custo desse equipamento e sua manutenção torna inviável a instalação em muitos sítios dos oceanos.

Sendo o planeta coberto por vastos oceanos e mares, a modelação numérica de ondas se torna uma ferramenta de essencial importância, pois é capaz de estimar os principais parâmetros de onda.

Atualmente os modelos de geração de ondas permitem prever o estado de agitação marítima com precisão satisfatória se o campo de ventos puder ser previsto ou descrito de forma igualmente confiável (Melo et al., 2008).

Os modelos numéricos tanto oceânicos como atmosféricos podem ser distinguidos entre *Hindcast* (que utilizam dados pretéritos, reanálises) que servem para analisar séries temporais e *Forecast*, utilizado para previsões.

Segundo Amrutha et al. (2016), modelos numéricos para ondas hindcast, para o presente e previsões, como Wave Action Model (WAM), WAVEWATCHIII (WW3), MIKE21 Spectral Waves, Simulating WAVes Nearshore (SWAN) são comumente usados, sendo os modelos WAM e WW3 mais adequados para modelagem em escala global e regional, e o SWAN é mais adequado para aplicações próximo a costa.

De acordo com (Bertotti & Cavaleri, 2009), o uso de um modelo global implica uma resolução relativamente grosseira, geralmente insuficiente para áreas caracterizadas perto de costas, onde os detalhes do litoral introduzem características muito pequenas para serem vistas em um modelo global. Nestes casos, um modelo de área limitada, trabalhando com alta resolução e aninhado no de grande escala, é a solução comumente aceita.

Segundo Mentaschi et al. (2015), uma alta resolução não é necessária em oceano aberto, onde não existem obstáculos no caminho de propagação das ondas e as variações batimétricas são suaves. Porém, a geração de erros sistemáticos devido a feições não resolvidas na batimetria, podem modificar significativamente a dinâmica das ondas.

Segundo Guimarães et al. (2015), a modelagem de ondas geradas pelo vento geralmente é realizada utilizando modelos de ondas espectrais de terceira geração. Os modelos desse tipo, como WAM e WW3 provaram ser adequados para uma descrição de ondas em águas profundas a intermediárias.

Chu et al. (2004), afirmam que o WW3 simulou a variabilidade sazonal da altura significativa de onda no Mar Meridional da China razoavelmente bem em comparação com os dados mensurados por satélite, indicando a capacidade do modelo para simulação de onda.

Os modelos de ondas oceânicas de terceira geração são modelos numéricos que integram as equações dinâmicas que descrevem a evolução do campo de ondas. Consistem de uma

representação explícita dos processos físicos relevantes para a evolução das ondas, fornecendo uma descrição bidimensional completa do estado do mar. O desenvolvimento desses modelos geraram o progresso na compreensão dinâmica das ondas oceânicas e experiência com métodos práticos de previsão (Komen et al., 1994).

Segundo Mentaschi et al. (2013; 2015) o que distingue os modelos de terceira geração dos anteriores (de primeira e segunda geração), é a representação aproximada das interações onda-onda não-lineares por meio da *Discrete Interaction Approximation* (DIA) (Hasselmann & Hasselmann, 1985). Como essas interações são responsáveis por uma transferência de energia gradual do modo de alta frequência para de baixa frequência, a adoção desta aproximação representa uma importante melhoria na simulação numérica da dinâmica de ondas (Mentaschi et al. 2013; 2015).

De acordo com Komen et al. (1994), a aplicação de modelos de terceira geração requer considerável poder de computação, que se tornou disponível nos últimos anos. A Universidade de Aveiro dispõe desse tipo de computação, ao qual vários departamentos, como o de Física e Unidades de Pesquisa, como o Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM) e Grupo de Meteorologia e Climatologia (Clim@UA), tem acesso.

O Grupo de Meteorologia e Climatologia do Departamento de Física, além de realizar previsões meteorológicas também realiza previsão da agitação marítima, sendo que para esta, utiliza o modelo de geração e propagação de ondas WW3. Dispondo desse recurso e tendo em mente a importância da aplicação da modelação numérica de ondas que motivou a realização deste trabalho, no entanto, o intuito foi aplicar o modelo WW3 no âmbito *hindcast*.

O WW3 é uma estrutura de modelagem de onda desenvolvido pelo National Centers for Environmental Prediction (NOAA/NCEP), que inclui os mais recentes avanços científicos no campo da modelagem de *wind-wave* e dinâmica (The WAVEWATCH III® Development Group [WW3DG], 2019). Seu núcleo de estrutura consiste em um modelo de onda de terceira geração, no âmbito do modelo WAM (WAMDIG, 1988; Komen et al., 1994; National Weather Service [NWS], 2009; WW3DG, 2019).

O WW3 resolve a equação de equilíbrio da densidade da ação espectral de fase aleatória para o espectro de número de onda-direção. A suposição implícita dessa equação é que as propriedades do meio (profundidade da água e corrente), bem como, o próprio campo de ondas, variam em escalas de tempo e espaço que são muito maiores do que as escalas de variação de uma única onda (NWS, 2009; WW3DG, 2019).

Os termos de fonte para processos físicos incluem parametrizações para o crescimento e decaimento das ondas devido as ações do vento, interações onda-onda ressonantes não-lineares, dispersão devido a interações da onda com o fundo, interações *triad*, dissipação devido *whitecapping* (arrebentação em águas profundas), fricção com o fundo, quebra de ondas induzida por profundidade (*surf-breaking*) e interações com lama e gelo (NWS, 2009; WW3DG, 2019).

O modelo computa processos de transformação como efeitos de correntes superficiais para campos de vento e ondas. As equações de governo incluem refração e deformação do campo de ondas devido a variações espaciais e temporais da profundidade média da água e correntes médias (marés, ondas etc.), quando aplicáveis. O modelo também inclui opções para aplicações em águas rasas (zona de surfe), porém, a física implementada para a zona de surfe até o momento ainda é bastante rudimentar (NWS, 2009; WW3DG, 2019).

O modelo considera a propagação das ondas linear. A propagação do espectro de ondas pode ser resolvida utilizando grade regular (retilíneo ou curvilíneo) ou não estruturada (triangular), individualmente ou combinado em mosaicos de múltiplas grades. O modelo tem um esquema de sub-grade (*sub-grid*) devido ao bloqueio/obstrução por ilhas não resolvidas, bem como, métodos de alívio para o *Efeito Garden Sprinkler* (NWS, 2009; WW3DG, 2019).

O espectro de energia da onda são discretizados usando um incremento direcional constante (cobrindo todas as direções) e uma grade de número de onda espacialmente variável (NWS, 2009; WW3DG, 2019).

O modelo é configurado para aninhamento tradicional (*one-way*), onde as grades do modelo são executadas como modelos separados consecutivamente, começando com os modelos com a menor resolução espacial, e também usando uma abordagem de mosaico ou grade múltipla (*multiple-grid*), aonde um número arbitrário de grades pode ser considerado com interação completa entre todas as grades (*two-way*), fazendo efetivamente com que o mosaico de grades funcione como um modelo único com resolução espacial variável (NWS, 2009; WW3DG, 2019).

Esquemas numéricos precisos de primeira, segunda e terceira ordem são disponíveis para descrever propagação de onda. Os termos de fonte são integrados no tempo usando um algoritmo de intervalo de tempo ajustado dinamicamente, que concentra esforços computacionais em condições com rápidas mudanças espectrais (NWS, 2009; WW3DG, 2019).

O WW3 é escrito em FORTRAN 90 no padrão ANSI (American National Standards Institute), totalmente modular e totalmente alocável (WW3DG, 2019). O modelo pode ser compilado para incluir paralelismos de memória compartilhada usando diretrizes de compilador *OpenMP*, como também para um ambiente de memória distribuída usando *Message Passing Interface* (MPI) (NWS, 2009; WW3DG, 2019).

Este trabalho visa avaliar o comportamento do modelo WW3 adotando um esquema de mosaico de múltiplas grades, com interação completa entre as mesmas (*two-way*) e com resolução espacial variável entre elas. Para isso, foi utilizado três grades aninhadas: uma grade de mais larga escala, englobando o oceano Atlântico Norte; uma grade abrangendo Portugal e porção noroeste da Espanha; e uma grade de menor escala, de mais alta resolução, compreendendo a região da Figueira da Foz (litoral centro-norte de Portugal).

Os modelos globais ou de grande escala são a fonte das informações básicas, um modelo aninhado se comporta de acordo com as informações das quais ele começa e suas condições de contorno subsequentes. Desde que recebam as informações corretas, os modelos aninhados são capazes de desempenhos excepcionais, pois concentram-se nos detalhes de uma determinada área, porém, confiando totalmente de onde assimilam as informações. O modelo aninhado cria detalhes, sendo de se esperar uma melhoria, podendo até haver diferentes evoluções e comportamentos em relação ao modelo de maior escala, caso algum tipo de evento for limitado à escala aninhada considerada. Caso contrário, o modelo de menor escala é forçado a agir com base nas informações iniciais e de fronteira do de maior escala e que no caso de informações erradas, será inevitavelmente refletido, possivelmente amplificado, no modelo aninhado (Bertotti e Cavaleri, 2009).

Melo et al. (2008), sustenta a utilidade de se usar grades aninhadas, pois obteve melhores resultados quando utilizou uma grade regional aninhada numa grade global. A execução do modelo na grade global fornece as condições de mar no contorno da grade regional, que são incorporadas

por esta nos cálculos. O autor afirma que o aninhamento com uma grade de maior resolução traz também o benefício de se ter um número maior de pontos na grade para coletar os outputs do modelo sem a necessidade de recorrer a interpolação.

Como o WW3 é mais indicado para modelagem de escala global e regional, o maior propósito deste trabalho é analisar o comportamento e resposta do modelo na grade aninhada de menor escala, ou seja, uma grade de escala mais local, com alta resolução, onde ressalta a região litorânea da Figueira da Foz, Portugal.

Na primeira parte do trabalho será apresentado uma fundamentação teórica do modelo, descrevendo as equações fundamentais que o governam e suas principais aproximações numéricas. Na sequência, será abordada a metodologia: recursos utilizados, configurações das grades, os procedimentos para execução do modelo, validação e calibração do modelo. Em seguida, serão descritos nas simulações realizadas e os resultados obtidos. E por fim, as considerações finais.

2. Fundamentação Teórica sobre o modelo

Nesta parte do trabalho será descrita as principais equações de governo e aproximações numéricas utilizadas no WW3, sendo que as mesmas foram extraídas do manual do usuário, versão 6.07 (The WAVEWATCH III® Development Group [WW3DG], 2019).

2.1. Equações de Governo do Modelo

Os componentes espectrais de ondas são retratados normalmente por parâmetros de fase: número de onda (k), vetor de número de onda (\mathbf{k}), direção (θ) e frequências. A direção (θ) é perpendicular à crista da onda (ou componente espectral), sendo igual à direção de (\mathbf{k}). O modelo faz distinção entre frequências, no caso de um referencial movendo-se com a corrente, usa a frequência intrínseca $\sigma (= 2\pi f_r)$ (relativa) e no caso de um referencial fixo, utiliza a frequência absoluta $\omega (= 2\pi f_a)$ (WW3DG, 2019).

Para ondas irregulares de vento, a variação (aleatória) da elevação da superfície do mar é descrita utilizando densidade do espectro F (espectro de energia), que é uma função de todos os parâmetros de fase independentes e que variam no espaço e no tempo em escalas maiores do que aquelas das ondas individuais $F(\mathbf{k}, \sigma, \omega; \mathbf{x}, t)$. As equações do modelo assumem que as escalas da variação da profundidade e correntes também são muito maiores do que aquela de uma onda individual. Essa suposição demanda uma batimetria de larga escala, para que desde forma, a difração da onda possa geralmente ser ignorada. Os efeitos de dispersão e interferência também são negligenciados por esta aproximação (WW3DG, 2019).

Com a aproximação da profundidade e corrente variando lentamente, pode ser aplicada localmente a teoria linear das ondas e seguir a relação de dispersão para inter-relacionar os parâmetros de fase (WW3DG, 2019).

$$\sigma^2 = gk \tanh kd, \quad (1)$$

$$\omega = \sigma + \mathbf{k} \cdot \mathbf{U}, \quad (2)$$

onde d é a profundidade média da água e \mathbf{U} é a velocidade da corrente (que são a profundidade e tempo médios sobre as escalas das ondas individuais).

Para ondas com altura 3 vezes menor do que a frequência das ondas dominantes (Leckler et al., 2015; WW3DG, 2019), a energia é muito próxima da relação de dispersão linear, de forma que as Eqs. (1) e (2) inter-relacionam \mathbf{k} , σ e ω . Desta forma, sobram apenas dois parâmetros de fase independentes, e o espectro local e instantâneo torna-se bidimensional.

O espectro selecionado dentro do modelo é o espectro de número de onda e direção $F(k, \theta)$, devido suas características de invariância em relação a física do crescimento e decaimento das ondas para profundidades de água variáveis. No entanto, o *output* do modelo consiste no espectro de frequência-direção $F(f_r, \theta)$. Os diferentes espectros podem ser calculados a partir do $F(k, \theta)$ usando transformações Jacobianas diretas e a partir destes espectros, demais espectros podem ser gerados pela integração sobre as direções, sendo que a integração sobre todo o espectro, fornece a variância total E (energia das ondas) (WW3DG, 2019).

A energia de um pacote de ondas é uma quantidade conservada nos casos sem correntes. Já em casos com correntes, a energia de um componente espectral não é mais conservada, pelo trabalho realizado pela corrente no momento médio de transferência das ondas (Longuet-Higgins e Stewart, 1961, 1962, como citado em WW3DG, 2019). Mas num sentido geral, de acordo com WW3DG (2019) a ação da onda é conservada $A \equiv E/\sigma$, tornando a densidade do espectro de ação das ondas $N(k, \theta) \equiv F(k, \theta)/\sigma$, o espectro de escolha dentro do modelo. Assim, a propagação de ondas é descrita por

$$\frac{DN}{Dt} = \frac{S}{\sigma}, \quad (3)$$

onde D/Dt representa a derivada total (movendo-se com um componente de onda) e S representa o efeito líquido de fontes e sumidouros para o espectro F . Devido ao lado esquerdo da Eq. (3) geralmente considerar propagação linear sem dispersão, os efeitos de propagação de onda não lineares e reflexões parciais de onda são definidos em S (WW3DG, 2019).

2.1.1. Propagação

Um balanço na equação (3) através de uma forma Euleriana é essencial. Podendo ser na forma de uma equação de transporte (com velocidades fora das derivadas), válida apenas para o espectro do número de onda vetorial $N(\mathbf{k}; \mathbf{x}, t)$ ou em uma forma conservativa (com velocidades dentro das derivadas), sendo que as equações válidas nesta forma podem ser derivadas para formulações espectrais arbitrárias, desde que a transformação Jacobiana correspondente seja bem aplicada. A forma conservativa preserva a energia/ação total das ondas, ao contrário da equação de transporte. Por conveniência de notação, o balanço da equação para o espectro $N(k, \theta; \mathbf{x}, t)$ utilizado no modelo, é simplesmente denotado como N (WW3DG, 2019).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\mathbf{x}} \cdot \dot{\mathbf{x}}N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k}N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}N = \frac{S}{\sigma}, \quad (4)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = c_g + \mathbf{U}, \quad (5)$$

$$\dot{k} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial s}, \quad (6)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial m} \right], \quad (7)$$

onde a velocidade de grupo $c_g = (c_g \sin \theta, c_g \cos \theta)$, d é a profundidade média da água, s é uma coordenada na direção θ e m é uma coordenada perpendicular a s . A equação (4) é válida para coordenadas cartesianas. Para aplicações em grande escala, esta equação é geralmente transferida para coordenadas esféricas, definidas por longitude λ e latitude ϕ , porém, mantendo a definição de variância local (por unidade de superfície) (WW3DG, 2019).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \dot{\phi} N \cos \theta + \frac{\partial}{\partial \lambda} \dot{\lambda} N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}_g N = \frac{S}{\sigma}, \quad (8)$$

$$\dot{\phi} = \frac{c_g \cos \theta + U_\phi}{R}, \quad (9)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{c_g \sin \theta + U_\lambda}{R \cos \theta}, \quad (10)$$

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{c_g \tan \theta \cos \theta}{R}, \quad (11)$$

onde R é o raio da terra e U_ϕ e U_λ são componentes das correntes. Desde modo o modelo pode ser executado utilizando coordenadas cartesianas ou esféricas sendo que ambas podem ser discretizadas, usando grades quadrangulares (retangulares, curvilíneos ou grades SMC) e triangulares (WW3DG, 2019).

2.1.2. Termos de Fonte

Segundo WW3DG (2019) a fonte de termo líquida S , em águas profundas, basicamente fundamenta-se de três partes: termo de interação atmosfera-onda S_{in} (geralmente é uma entrada de energia positiva, mas no caso de swell é negativa); termo de interação onda-onda não linear S_{nl} ; e um termo de interação onda-oceano S_{ds} (geralmente governado pela quebra de onda). O termo de entrada S_{in} é governado pelo crescimento exponencial vento-onda e geralmente descreve apenas este processo dominante. Contudo, para inicialização do modelo fornecer um crescimento de onda inicial mais realista, um termo de entrada linear S_{lin} pode ser adicionado.

Processos adicionais devem ser considerados em águas rasas, mais especificamente as interações da onda com o fundo S_{bot} . Na zona de rebentação, se o termo S_{ds} não representar bem a quebra de onda, um termo de quebra adicional deve ser considerado (S_{db}). Também podem ser consideradas as interações onda-onda *triad* (S_{tr}), porém, atualmente as parametrizações têm precisão limitada. Também estão disponíveis no modelo outros termos de fonte como: dispersão das ondas por características de fundo (S_{sc}); interações onda-gelo (S_{ice}); reflexão por linhas de costa ou objetos flutuantes (S_{ref}); e um termo fonte adicional que pode ser definido pelo usuário (S_{user}) (WW3DG, 2019).

Com isso, os termos de fonte gerais utilizados no modelo seguem abaixo. Demais termos de fonte podem ser adicionados (WW3DG, 2019).

$$S = S_{lin} + S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} + S_{tr} + S_{sc} + S_{ice} + S_{ref} + S_{user}. \quad (12)$$

Estes são os termos de fonte definidos para os espectros de energia, contudo, a maior parte deles são calculados diretamente para o espectro de ação, sendo que os últimos termos de fonte são denotados como $\mathcal{S} \equiv S/\sigma$ (WW3DG, 2019).

De acordo com WW3DG (2019) o que define os modelos de onda de terceira geração é o tratamento explícito das interações não lineares. Os termos S_{in} e S_{ds} representam processos separados, porém, muitas vezes inter-relacionados, devido ao equilíbrio desses dois termos de fonte governarem as características de crescimento integral da energia das ondas.

A parametrização dos termos de fonte ou o intervalo de tempo (*time step*) utilizados podem não permitir que um equilíbrio adequado seja obtido, portanto, o modelo integra o espectro até uma frequência de corte (f_{hf}) ou número de onda (k_{hf}), que é igual à frequência de discretização mais alta. Assim, (f_{hf}) pode ser considerado dentro da faixa de frequência do modelo, acima dessa frequência de corte uma cauda paramétrica é aplicada, que pode ser transformada em qualquer outro espectro por meio das transformações Jacobianas. Para o espectro de ação presente, assumindo águas profundas para os componentes de onda na cauda, o parâmetro da cauda pode ser expresso abaixo (WW3DG, 2019).

$$N(k, \theta) = N(k_{hf}, \theta) \left(\frac{f_r}{f_{r,hf}} \right)^{-m-2}, \quad (13)$$

sendo que os valores de m e as expressões para $f_{r,hf}$ irão depender dos parâmetros do termo fonte usado.

Nos casos de cobertura parcial de gelo o tratamento dos termos de fonte segue o conceito de uma interface limitada (ar-mar), devido ao momento transferido da atmosfera para as ondas ser limitado. Portanto, os termos de fonte de entrada e dissipação são escalados pela fração da concentração de gelo e implementado de modo que seja independente do termo de fonte selecionado (WW3DG, 2019).

2.2. Aproximações Numéricas

A equação básica de ação de onda no modelo é a equação (4) em coordenadas cartesianas ou a equação (8) em coordenadas esféricas. No entanto, o modelo utiliza versões modificadas dessas equações para que possam ser resolvidas em uma grade de número de onda variável; para poderem descrever adequadamente a dispersão para equações discretizadas nos esquemas numéricos; e resolver obstáculos na sub-grade, tal como ilhas, quando considerados (WW3DG, 2019).

2.2.1. Discretização Espectral

Se a Eq. (4) ou Eq. (8) é resolvida diretamente, ocorre uma redução da resolução espectral em águas rasas, que pode ser evitada ao resolver a equação em uma grade de número de onda variável, pois desde modo, insere implicitamente as mudanças cinemáticas do número de onda devido ao empolamento. Tal grade é invariante espacialmente e temporalmente na frequência relativa (Tolman e Booij, 1998, como citado em WW3DG, 2019). Assim, a grade de número de onda local correspondente pode ser calculada diretamente a partir da grade de frequência invariante e da relação de dispersão (Eq. (1)), tornando-se uma função da profundidade local d . Para economia de cálculos de S_{nl} e permitir a separação das frequências de swell, o modelo adota uma discretização de frequência com incrementos exponencialmente crescentes, de modo que a resolução da frequência variando é proporcional à frequência local (WW3DG, 2019).

$$\sigma_{m+1} = X_\sigma \sigma_m, \quad (14)$$

onde m é um contador de grade discreto no espaço- k . X_σ é definido pelo usuário, normalmente $X_\sigma \simeq 1.1$ é usado.

Será utilizado como exemplo a Eq. (4) (coordenadas cartesianas) para os efeitos da grade variando espacialmente, é trivial a adaptação à grade esférica. A grade de número de onda variável é representada por κ , assim, a equação de equilíbrio torna-se (WW3DG, 2019).

$$\frac{\partial N}{\partial t c_g} + \frac{\partial \dot{x}N}{\partial x c_g} + \frac{\partial \dot{y}N}{\partial y c_g} + \frac{\partial \dot{\kappa}N}{\partial \kappa c_g} + \frac{\partial \dot{\theta}N}{\partial \theta c_g} = \frac{S}{\sigma c_g}, \quad (15)$$

$$\dot{\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial \kappa} = c_g^{-1} \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla_x d \right) - \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{s}}. \quad (16)$$

2.2.2. Fragmentação da Equação da Ação de Onda

De acordo com WW3DG, (2019), a Eq. (15) é resolvida utilizando um método de etapa fracionária, onde a primeira etapa trata as variações temporais da profundidade e as mudanças correspondentes na grade do número de onda. Separando os efeitos das variações (temporais) do nível da água, a grade torna-se invariante e a profundidade quase estável para as etapas fracionárias restantes. Já as demais etapas fracionárias consistem da propagação espacial, propagação intra-espectral e termos de fonte. Para um modelo de grade única, a seguinte sequência de integração é realizada:

1. Atualização do nível de água

2. Intra-espectral parte 1: integração sobre $\Delta t_g/2$ de $\frac{\partial N}{\partial t c_g} + \frac{\partial \dot{\kappa}N}{\partial \kappa c_g} + \frac{\partial \dot{\theta}N}{\partial \theta c_g} = 0$

3. Propagação espacial: integração sobre Δt_g de $\frac{\partial N}{\partial t c_g} + \frac{\partial \dot{x}N}{\partial x c_g} + \frac{\partial \dot{y}N}{\partial y c_g} = 0$

4. Intra-espectral parte 2: integração sobre $\Delta t_g/2$ de $\frac{\partial N}{\partial t c_g} + \frac{\partial \dot{\kappa}N}{\partial \kappa c_g} + \frac{\partial \dot{\theta}N}{\partial \theta c_g} = 0$

5. Integração do termo fonte: integração sobre Δt_g de $\frac{\partial N}{\partial t c_g} = \frac{S_{no\ ice}}{\sigma c_g}$

6. Integração de termos de fonte de gelo: integração sobre Δt_g de $\frac{\partial N}{\partial t c_g} = \frac{S_{ice}}{\sigma c_g}$

A sucessão dessas 6 etapas é, no limite $\Delta t_g \rightarrow 0$, equivalente para a integração da Eq. (15) sobre um intervalo de tempo global Δt_g . Essa divisão em várias etapas permite uma eficiente vetorização e paralelização ao mesmo tempo, permitindo o uso de intervalos de tempo parcialmente separados ou ajustados dinamicamente nas diferentes etapas fracionárias do modelo. Assim, o modelo faz uma distinção entre 4 time steps diferentes (WW3DG, 2019).

1) O intervalo de tempo geral (global) Δt_g , é o menor intervalo de tempo ao qual obtêm-se uma solução fisicamente significativa, porque todos os termos da equação foram integrados, sendo a etapa comum de todas as sub-integrações separadas. É o intervalo de tempo onde é possível avaliar o output do modelo ou acoplamento com outros modelos. A eficiência desse intervalo de tempo

considera os intervalos de tempo solicitados em que o forçamento do modelo está disponível e em que o output do modelo é solicitado. No caso de um modelo forçado não acoplado, é o intervalo de tempo que os inputs de ventos e correntes são interpolados. No caso de um sistema de múltiplas-grades, é o intervalo de tempo em que a comunicação entre grades é realizada (WW3DG, 2019).

2) O segundo intervalo de tempo é o da propagação espacial (CFL - Courant–Friedrichs–Lewy), a interpretação correta deste intervalo de tempo fornece a precisão numérica para o modelo. Representa a distância normalizada pela qual as informações se propagam em um único intervalo de tempo. Caso a informação se propague por várias caixas da grade antes que os termos de fonte sejam aplicados, ocorre uma imprecisão numérica (WW3DG, 2019).

Para a frequência com contador m , o intervalo de tempo máximo $\Delta t_{p,m}$, é calculado dentro do modelo pela equação

$$\Delta t_{p,m} = \frac{\dot{x}_{p,r}}{\dot{x}_{p,m}} \Delta t_{p,r}, \quad (17)$$

onde $\Delta t_{p,r}$ (fornecida pelo usuário) é referência máxima de propagação do intervalo de tempo para a mais baixa frequência do modelo (não assumindo correntes e nenhum movimento da grade), $\dot{x}_{p,r}$ é a velocidade máxima de advecção para as ondas mais longas sem correntes ou movimento da grade e $\dot{x}_{p,m}$ é a velocidade real máxima de advecção (incluindo correntes) para a frequência m (WW3DG, 2019).

Se $CFL < \Delta t_g$, os efeitos de propagação são calculados com uma série de intervalos de tempo menores sucessivos, isso implica que vários intervalos de tempo parciais são utilizados para a mais baixa frequência. Já as frequências mais altas, são propagadas através de um único cálculo sobre Δt_g (resultando assim, em um modelo significativamente mais eficiente). O $\Delta t_{p,m}$ pode ser definido maior do que Δt_g , mas para casos com fortes correntes tem um potencial impacto na economia do modelo (WW3DG, 2019).

Para identificar a estabilidade numérica do esquema, um número CFL crítico (C_c) é definido segundo a equação abaixo

$$C_c = \frac{C_{g,max} \Delta t}{\min(\Delta x, \Delta y)}, \quad (18)$$

onde $C_{g,max}$ é a velocidade máxima de grupo, e Δt , Δx e Δy são incrementos de tempo e espaço. A velocidade máxima de grupo é a velocidade do grupo para a frequência discreta mais baixa do modelo. O número CFL inclui os efeitos das correntes (Eq. (5)) e movimento da grade, que são contabilizados internamente no modelo que ajusta dinamicamente o intervalo de tempo mínimo correspondente, dependendo das velocidades da corrente e do movimento da grade. Contudo, definindo um intervalo de tempo de propagação mínimo, ignorar-se as correntes e o movimento da grade (neste caso, CFL crítico é 1) (WW3DG, 2019).

3) O terceiro intervalo de tempo é o intervalo de tempo para a propagação intra-espectral (refração máxima e mudança do número de onda). Para grades de larga escala e águas profundas, este intervalo de tempo pode geralmente ser igual ao time step global Δt_g . Para grades de águas rasas, intervalos de tempo menores de propagação intra-espectral permitem maiores efeitos de refração dentro das restrições de estabilidade do esquema. Como demonstrado anteriormente, a ordem de

invocação da propagação espacial e intra-espectral é alternada, aprimorando assim a precisão numérica (WW3DG, 2019).

Definindo este intervalo de tempo igual ou maior que Δt_g , implica em uma máxima economia do modelo, no entanto, isso altera a ordem dos cálculos espaciais e de refração para intervalos de tempo consecutivos no modelo, que em casos de forte refração (*swell* de longo período), pode resultar em uma ondulação dos parâmetros médios de onda, podendo levar a uma menor oscilação com um período de $2\Delta t$. Isso pode ser evitado configurando este intervalo de tempo para uma fração de número inteiro de Δt_g (preferivelmente metade do Δt_g) (WW3DG, 2019).

Para garantir a estabilidade numérica as velocidades de refração são filtradas. Essa filtragem suprime a refração em casos com mudança repentina da topografia fundo. O impacto dessa filtragem é reduzido quando o intervalo de tempo de refração é reduzido. Portanto, o intervalo de tempo de refração depende de quão forte pode ser a corrente na grade em questão (WW3DG, 2019).

4) O intervalo de tempo final é intervalo de tempo mínimo para a integração dinâmica dos termos de fonte. É uma segurança para evitar intervalos de tempo proibitivamente pequenos na integração dos termos de fonte. É ajustado dinamicamente para cada Δt_g e para cada ponto separado na grade, resultando em cálculos mais precisos para mudanças rápidas nas condições de vento e onda e uma maior integração econômica para condições variando lentamente. É definido um intervalo de tempo mínimo para limitar o tempo de cálculo. Aumentar esse intervalo de tempo não melhora necessariamente a economia do modelo, um maior intervalo de tempo de integração dos termos de fonte aumentará o ruído espectral na integração, que por sua vez, pode reduzir o intervalo de tempo médio de integração dos termos de fonte (WW3DG, 2019).

2.2.3. Variações da Profundidade no Tempo

Segundo WW3DG (2019), as variações temporais na profundidade resultam em uma mudança da grade de número de onda local, devido ao espectro do número de onda ser invariante em relação às mudanças temporais da profundidade, isso corresponde a uma simples interpolação do espectro da grade anterior para a grade nova, sem alterações na forma espectral. Assim, a nova grade segue simplesmente a grade de frequência invariante globalmente, a nova profundidade da água d e a relação de dispersão da Eq. (1).

2.2.4. Propagação Espacial

Para a propagação espacial será utilizado como exemplo as equações para grade em coordenadas esféricas Eq. (8), a conversão para grade em coordenadas cartesianas geralmente é uma simplificação.

A propagação espacial é descrita pelos primeiros termos da Eq. (15), desde modo, a etapa de propagação espacial para grades esféricas torna-se (WW3DG, 2019)

$$\frac{\partial \mathcal{N}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \phi} \dot{\phi} \mathcal{N} + \frac{\partial}{\partial \lambda} \dot{\lambda} \mathcal{N} = 0, \quad (19)$$

onde a quantidade propagada \mathcal{N} é definida como $\mathcal{N} \equiv N c_g^{-1} \cos \phi$. Para a grade cartesiana, uma equação semelhante é encontrada para $\mathcal{N} \equiv N c_g^{-1}$.

A equação (19) é idêntica na forma à equação convencional de propagação em águas profundas, mas ambas incluem os efeitos de profundidade e correntes limitadas. Nos limites terra-água, a ação das ondas que se propagam em direção à terra é considerada absorvida sem reflexão, e as ondas que se propagam para longe da costa são consideradas como não tendo energia na linha costeira. Nos pontos de fronteira ativos (ou seja, onde as condições de fronteira são prescritas) a ação deslocando em direção a esses pontos é absorvida, enquanto a ação na fronteira dos pontos é utilizada para estimar fluxos de ação para componentes deslocando dentro modelo (WW3DG, 2019).

2.2.4.1. Esquemas Numéricos de Propagação

Os esquemas de propagação para grades regulares são esquemas de primeira, segunda e terceira ordem, sendo que o esquema padrão do WAVEWATCH III é um esquema terceira ordem *QUICKEST* (Leonard, 1979; Davis e More, 1982, como citado em WW3DG, 2019), combinado com o limitador *ULTIMATE TVD* (total variance diminishing) (Leonard, 1991, como citado em WW3DG, 2019). Esse esquema é baseado em esquemas de diferenças finitas de mais alta ordem, sendo preciso tanto no tempo como no espaço (WW3DG, 2019).

Segundo WW3DG (2019), este esquema é aplicado à propagação nas direções longitudinal e latitudinal separadamente, alternando a direção a ser tratada primeiro. O fluxo entre pontos da grade com contadores i e $i - 1$ no espaço- ϕ ($\mathcal{F}_{i,-}$) é demonstrado abaixo

$$\mathcal{F}_{i,-} = [\dot{\phi}_b \mathcal{N}_b]_{j,l,m}^n, \quad (20)$$

$$\dot{\phi}_b = 0.5 (\dot{\phi}_{i-1} + \dot{\phi}_i), \quad (21)$$

$$\mathcal{N}_b = \frac{1}{2} [(1 + C)\mathcal{N}_{i-1} + (1 - C)\mathcal{N}_i] - \left(\frac{1-C^2}{6}\right) cu \Delta \phi^2, \quad (22)$$

$$cu = \begin{cases} (\mathcal{N}_{i-2} - 2\mathcal{N}_{i-1} + \mathcal{N}_i) \Delta \phi^{-2} & \text{for } \dot{\phi}_b \geq 0 \\ (\mathcal{N}_{i-1} - 2\mathcal{N}_i + \mathcal{N}_{i+1}) \Delta \phi^{-2} & \text{for } \dot{\phi}_b < 0 \end{cases}, \quad (23)$$

$$C = \frac{\dot{\phi}_b \Delta t}{\Delta \phi}, \quad (24)$$

onde cu é a curvatura (*upstream*) da distribuição da densidade de ação, e onde C é um número CFL incluindo um sinal para identificar a direção de propagação. Este esquema fornece soluções estáveis para $|C| \leq 1$. Os fluxos ($\mathcal{F}_{i,+}$) entre os pontos da grade com contadores $i + 1$ e i são obtidos substituindo os índices apropriados. Para garantir que este esquema não gere extremos físicos, é utilizado em combinação com o limitador *ULTIMATE*. Este limitador usa a densidade de ação *central*, *upstream* e *downstream* (c , u , e d , respectivamente) (WW3DG, 2019)

$$\begin{aligned} \mathcal{N}_c = \mathcal{N}_{i-1}, \quad \mathcal{N}_u = \mathcal{N}_{i-2}, \quad \mathcal{N}_d = \mathcal{N}_i & \quad \text{for } \dot{\phi}_b \geq 0 \\ \mathcal{N}_c = \mathcal{N}_i, \quad \mathcal{N}_u = \mathcal{N}_{i+1}, \quad \mathcal{N}_d = \mathcal{N}_{i-1} & \quad \text{for } \dot{\phi}_b < 0 \end{aligned} \quad (25)$$

Também é utilizado um esquema alternativo se um dos dois pontos de grade adjacente ao limite da célula estiver em terra ou representar um ponto de fronteira ativa, neste caso, a condição de fronteira representa um esquema simples de primeira ordem (*upwind*), que não requer o limitador. O esquema final de propagação, torna-se (WW3DG, 2019)

$$\mathcal{N}_{i,j,l,m}^{n+1} = \mathcal{N}_{i,j,l,m}^n + \frac{\Delta t}{\Delta \phi} [\mathcal{F}_{i,-} - \mathcal{F}_{i,+}]. \quad (26)$$

O esquema para propagação no espaço- λ é simplesmente obtido alternando os índices e incrementos nas equações. O esquema *ULTIMATE QUICKEST* é implementado como esquemas unidimensionais alternados, para que a velocidade máxima do componente de advecção necessário seja utilizada na Eq. (17). Para consistência, os mesmos intervalos de tempo são utilizados para propagação de λ e ϕ para um determinado componente (WW3DG, 2019).

2.2.5. Propagação Intra-espectral

A terceira etapa do algoritmo fracionário numérico considera a refração e as mudanças residuais do número de onda (induzido pela corrente). Independentemente da discretização da grade espacial e do sistema de coordenadas, assim, a equação a ser resolvida torna-se (WW3DG, 2019)

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k}_g N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}_g N = 0, \quad (27)$$

$$\dot{k}_g = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\mathbf{U} \cdot \nabla_x d}{c_g} - \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial s}, \quad (28)$$

onde \dot{k}_g é a velocidade do número de onda em relação à grade, e $\dot{\theta}_g$ é dado pelas Eqs. (7) e (11). Esta equação não requer condições de fronteira no espaço- θ , pois, o modelo usa o espaço direcional completo (fechado), já no espaço- k , as condições de fronteira são necessárias. Para baixos números de onda, assume-se que nenhuma ação de onda existe fora do domínio discreto, portanto, atribui-se que nenhuma ação entra no modelo em um limite discreto de baixo número de onda. Já em um limite alto de número de onda, o transporte através do limite discreto é calculado assumindo uma forma espectral paramétrica conforme Eq. (13). As derivadas da profundidade na avaliação de $\dot{\theta}$ são determinadas usando diferenças centrais. Para pontos próximos à terra, são usadas diferenças unilaterais utilizando somente pontos em água (WW3DG, 2019).

De acordo com WW3DG (2019), a velocidade de refração pode se tornar extrema para ondas longas em águas extremamente rasas ou devido a fortes correntes de corte, por consequência disso, a propagação no espaço- θ pode causar problemas práticos em um esquema numérico explícito, da mesma forma, a propagação no espaço- k sofre de problemas semelhantes em águas muito rasas. Para evitar a necessidade de intervalos de tempo extremamente pequenos devido à refração, as velocidades de propagação no espaço- θ e no espaço- k (Eq. (7)) são filtradas,

$$\dot{\theta} = X_{rd}(\lambda, \phi, k)(\dot{\theta}_d + \dot{\theta}_c + \dot{\theta}_g), \quad (29)$$

onde os índices d , c e g se referem à profundidade, corrente e ao grande círculo, relacionado a fração da velocidade de refração na Eq. (7). O fator de filtro X_{rd} é calculado para cada número de onda e localização separadamente, e é determinado de modo que o número CFL para propagação

no espaço- θ devido ao termo de refração da profundidade não poder exceder um valor predefinido pelo usuário. Isso corresponde a uma redução da inclinação do fundo para alguns componentes de onda de baixa frequências (os componentes de ondas longas geralmente transportam energia significativa em direção à costa, onde sua energia é dissipada de alguma maneira). O efeito desse filtro pode ser testado reduzindo os intervalos de tempo da refração intra-espectral e observando os números máximos de CFL na saída do modelo. Eles são calculados antes de o filtro ser aplicado. O espaço espectral é sempre discretizado com incrementos direcionais constantes e uma grade de frequência logarítmica (Eq. (14)) para acomodar cálculos de interação não linear S_{nl} (WW3DG, 2019).

2.2.5.1. Esquema de Terceira Ordem (UQ)

De acordo com WW3DG (2019), o esquema *ULTIMATE QUICKEST* para o espaço- θ é implementado de forma similar ao esquema para o espaço físico, com a diferença de que o espaço de direção fechada não requer condições de contorno. O espaçamento da grade variável no espaço- k requer algumas modificações no esquema descrito por (Leonard, 1979, como citado em WW3DG, 2019) e as Eqs. (20) a (24) tornam-se então

$$\mathcal{F}_{m,-} = [\dot{k}_{g,b} N_b]_{i,j,l}^n, \quad (30)$$

$$\dot{k}_{g,b} = 0.5 (\dot{k}_{g,m-1} + \dot{k}_{g,m}), \quad (31)$$

$$N_b = \frac{1}{2} [(1 + C)N_{i-1} + (1 - C)N_i] - \frac{1-C^2}{6} cu \Delta k_{m-1/2}^2, \quad (32)$$

$$cu = \begin{cases} \frac{1}{\Delta k_{m-1}} \left[\frac{N_m - N_{m-1}}{\Delta k_{m-1/2}} - \frac{N_{m-1} - N_{m-2}}{\Delta k_{m-3/2}} \right] & \text{for } \dot{k}_b \geq 0 \\ \frac{1}{\Delta k_m} \left[\frac{N_{m+1} - N_m}{\Delta k_{m+1/2}} - \frac{N_m - N_{m-1}}{\Delta k_{m-1/2}} \right] & \text{for } \dot{k}_b < 0 \end{cases}, \quad (33)$$

$$C = \frac{\dot{k}_{g,b} \Delta t}{\Delta k_{m-1/2}}, \quad (34)$$

onde Δk_m é a banda discreta ou largura da célula no ponto da grade m , e onde $\Delta k_{m-1/2}$ é a distância entre os pontos da grade com contadores m e $m - 1$. O limitador *ULTIMATE* também pode ser aplicado se o número CFL da Eq. (34) é utilizado. Nos limites de baixo e alto número de onda, os fluxos são estimados usando uma abordagem *upwind* de primeira ordem, com suas respectivas condições de fronteira. O esquema final no espaço- k torna-se (WW3DG, 2019).

$$N_{i,j,l,m}^{n+1} = N_{i,j,l,m}^n + \frac{\Delta t}{\Delta k_m} [F_{m,-} - F_{m,+}], \quad (35)$$

2.2.6. Integração dos Termos de Fonte (sem gelo)

Os termos de fonte que não envolvem gelo são contabilizados segundo a equação abaixo

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \mathcal{S}_{no\ ice}. \quad (36)$$

É utilizado um esquema de integração semi-implícito (como no modelo WAM), assim a mudança discreta de densidade de ação ΔN torna-se (WAMDIG, 1988; WW3DG, 2019).

$$\Delta N(k, \theta) = \frac{S(k, \theta)}{1 - \epsilon D(k, \theta) \Delta t}, \quad (37)$$

onde D representa os termos diagonais da derivada de S em relação a N (WAMDIG, 1988), e ϵ define o deslocamento (*offset*) do esquema, ($\epsilon = 1$) é utilizado (WW3DG, 2019).

Neste esquema, segundo WW3DG (2019), a integração sobre Δt_g pode ser realizada em vários intervalos de tempo dinâmicos Δt_d , dependendo dos termos de fonte S , da mudança máxima da densidade de ação ΔN_m e do remanescente Δt_g . Para o n^{th} intervalo de tempo dinâmico na integração sobre Δt_g , três etapas são utilizadas para calcular Δt_d^n

$$\Delta t_d^n = \min_{f < f_{hf}} \left[\frac{\Delta N_m}{|S|} \left(1 + \epsilon D \frac{\Delta N_m}{|S|} \right)^{-1} \right], \quad (38)$$

$$\Delta t_d^n = \max [\Delta t_d^n, \Delta t_{d, \min}], \quad (39)$$

$$\Delta t_d^n = \min [\Delta t_d^n, \Delta t_g - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_d^i], \quad (40)$$

onde Δt_{\min} é um intervalo de tempo mínimo definido pelo usuário, adicionado para evitar intervalos de tempo excessivamente pequenos. Assim, o novo espectro correspondente N^n torna-se (WW3DG, 2019).

$$N^n = \max \left[0, N^{n-1} + \left(\frac{S \Delta t_d}{1 - \epsilon D \Delta t_d} \right) \right]. \quad (41)$$

A mudança da densidade de ação máxima ΔN_m é determinada a partir de uma mudança paramétrica de densidade de ação ΔN_p e uma mudança relativa filtrada ΔN_r (WW3DG, 2019)

$$\Delta N_m(k, \theta) = \min [\Delta N_p(k, \theta), \Delta N_r(k, \theta)], \quad (42)$$

$$\Delta N_p(k, \theta) = X_p \frac{\alpha}{\pi} \frac{(2\pi)^4}{g^2} \frac{1}{\sigma k^3}, \quad (43)$$

$$\Delta N_r(k, \theta) = X_r \max [N(k, \theta), N_f], \quad (44)$$

$$N_f = \max \left[\Delta N_p(k_{\max}, \theta), X_f \max_{\forall k, \theta} \{N(k, \theta)\} \right], \quad (45)$$

onde X_p , X_r e X_f são constantes definidas pelo usuário, α é um nível de energia do espectro ($\alpha = 0,62 \times 10^{-4}$) e k_{\max} é o número de onda discreto máximo. A forma espectral paramétrica na equação (43) corresponde em águas profundas à forma de alta frequência do espectro de frequência unidimensional $F(f) \propto f^{-5}$. A ligação entre o nível do filtro e a mudança paramétrica máxima na equação (45) é usada para garantir que o intervalo de tempo dinâmico permaneça razoavelmente grande em casos com energias de onda extremamente pequenas. Uma segurança final para estabilidade de integração é fornecida limitando a mudança de densidade de ação discreta para a mudança paramétrica máxima (Eq. (43)) nas condições onde a Eq. (39) prescreve Δt_d^n . Neste caso, a Eq. (39) torna-se um limitador (WW3DG, 2019).

Segundo WW3DG (2019), o intervalo de tempo dinâmico é calculado para cada ponto da grade separadamente, adicionando esforço computacional somente para pontos da grade nos quais o espectro está sujeito a mudanças rápidas. Os termos de fonte são recalculados para cada intervalo de tempo dinâmico.

3. Metodologia e Recursos Utilizados

3.1. Execução do molelo

O núcleo (driver) do modelo é uma sub-rotina dentro da estrutura do WAVEWATCH III. Os ficheiros gerados por esta sub-rotina são identificados com a extensão de arquivo (.ww3), exceto no modelo de onda de múltiplas grades, onde a extensão do ficheiro identifica cada grade individualmente no mosaico. Para simplificar e melhor compreender o funcionamento do modelo a extensão (.ww3) será utilizada. Para executar esta sub-rotina necessita um programa que atualize dinamicamente os dados de onda, o WW3 fornece o (ww3_shel e ww3_multi). Programas auxiliares também são necessários como: o pré-processador de grades (ww3_grid), pré-processador de entrada (ww3_prnc), e pós- processador para dados de saída (ww3_ounf) (WW3DG, 2019).

Existem três etapas principais para executar o modelo: o pré-processo, a execução da simulação e o pós-processo (WW3DG, 2019).

O pré-processo compreende a geração de ficheiros base, a definição do modelo e a definição do campo de forçamentos. Executado estas etapas, o modelo está pronto para a executar a simulação. Após executada a simulação, vem a etapa do pós-processo, que consiste na conversão dos resultados.

O modelo funciona por meio de subprogramas: para cada subprograma é preenchido um ficheiro de entrada (input file), executado o subprograma, gera um ficheiro de saída (output file), que é necessário para executar o subprograma seguinte (Cagnin et al., 2019).

Deste modo, os ficheiros necessários para executar a simulação podem ser divididos em ficheiros de entrada, executáveis e outputs. Os ficheiros de entrada, representados pela extensão (.inp), contém as informações que são lidas por meio dos ficheiros executáveis dos seus respectivos subprogramas (ww3_grid, ww3_prnc, ww3_shel e ww3_multi, ww3_ounf).

Como anteriormente citado, a aplicação de modelos de terceira geração requerem considerável poder de computação (Komen et al., 1994). A Universidade de Aveiro dispõe do Argus, que é uma plataforma *High Performance Computing* (HPC), baseada em Linux (CentOS 7). Para executar os subprogramas, foi necessário acessar a plataforma e executar os subprogramas como um “job” no Linux.

3.1.1. Pré-processo

3.1.1.1. Ficheiros Base

O primeiro passo é a geração das grades, um pacote de software baseado em Matlab® foi desenvolvido para automatizar a geração de grades (Chawla & Tolman, 2007). Nesse script matlab define-se a resolução das grades e a batimetria desejada.

A Figura 1, a Figura 2 e a Figura 3, representam o aninhamento das grades global, regional e local e seus respectivos domínios. As resoluções das mesmas serão apresentadas na parte do trabalho que discorre sobre as simulações realizadas.

Nos estudos realizados por Melo et al. (2008) na costa sul brasileira, as diferentes batimetrias testadas (ETOPO e GEBCO) não afetaram significativamente os resultados do modelo, provavelmente pelo fato do ponto analisado estar no final da parte externa da plataforma continental (cerca de 70 m de profundidade), indicando que para profundidades intermediárias da plataforma continental, ambas batimetrias apresentaram resultados similares. Para profundidades menores (plataforma interna), onde as batimetrias mostraram diferenças, o autor salienta que o próprio uso do modelo WW3 é pouco recomendado, portanto, conclui que é indiferente o uso de uma ou outra batimetria em implementações do WW3 nesse trecho da costa brasileira. O autor sustenta que as ondas geradas pelo vento têm comprimentos na ordem de grandeza de algumas centenas de metros, assim, os efeitos de refração ficam restritos a profundidades (tipicamente) menores que 150 metros. O autor ainda salienta que em sua resolução mais refinada (0.25°) o modelo capta o relevo do fundo apenas em pontos a cada 0.25° (ou seja, um ponto de batimetria aproximadamente a cada 30 km), com isso, feições com escalas menores que cerca de 30 km não entraram na refração calculada pelo modelo.

Desta forma, pode-se concluir que quanto maior for a resolução da grade, maior probabilidade do modelo contabilizar o efeito da refração. A batimetria utilizada neste trabalho foi a *GEBCO_2014 Grid*, com dados em intervalos de 30 *arc-seconds*, aproximadamente 1 km.

Após executar o script Matlab anteriormente citado, obtém-se quatro ficheiros para cada grade: (.bot) que compreende a batimetria; (.mask) que distingue os pontos na grade que são de terra ou água; (.obst) que representa pontos de obstrução na grade; e (.meta), que é um ficheiro contendo todas as informações necessárias sobre a grade. Os ficheiros: (.bot), (.mask) e (.obst) servem de base para a definição do modelo.



Figura 1. Aninhamento das grades global, regional e local. Sendo os limites de domínio da grade global: 70°N , -90° , 10°N e 0° , coordenadas em graus decimais.



Figura 2. Limites de domínio da grade regional (coordenadas em graus decimais), o quadrante menor representa a grade local aninhada na grade regional. A linha vermelha na extremidade direita da figura representa o limite mais a leste da grade global.

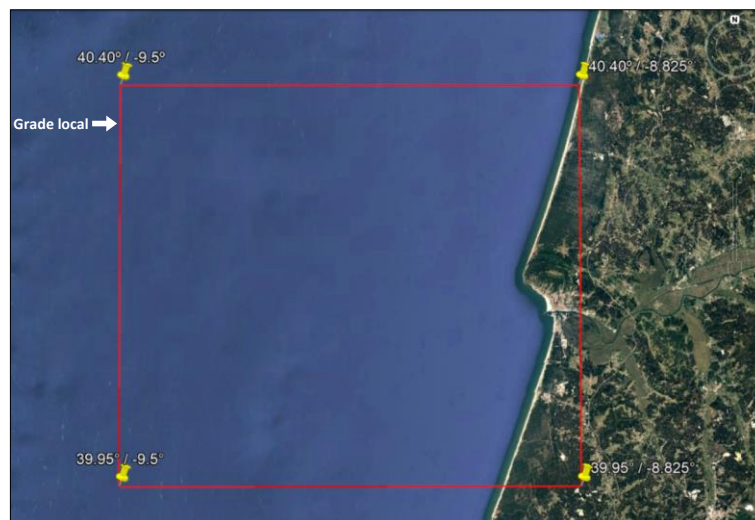


Figura 3. Limites de domínio da grade local, coordenadas em graus decimais.

3.1.1.2. Definição do Modelo

O ficheiro (.meta) é utilizado para preencher o ficheiro de entrada (ww3_grid.inp) com as informações do tipo de grade, resolução e limites de domínio da grade. No ficheiro (ww3_grid.inp) também é definido as frequências da grade, número de direções de onda (*bins*) e os intervalos de tempo da grade.

Foi utilizado grades regulares retilíneas. O domínio espectral da grade do número de onda foi discretizado em 32 componentes de frequência, com fator de incremento 1.1, sendo a frequência inicial em 0.0373 Hz, conforme abaixo:

$$\sigma_{m+1} = X_{\sigma} \sigma_m, m = 0, 1, \dots, 31.$$

$$X_{\sigma} = 1.1, \quad \sigma_0 = 0.0373$$

Na grade global e regional o espectro de direções de onda foi discretizado em 24 bins ($\Delta\theta = 15^\circ$) e na grade local em 36 bins ($\Delta\theta = 10^\circ$).

Para se definir os intervalos de tempo do modelo a primeira etapa é calcular o intervalo de tempo da propagação espacial (CFL máximo), que depende da frequência mais baixa (f_{\min}) e da resolução espacial da grade. Como supracitado, a frequência mais baixa pré-definida neste trabalho foi 0,0373 Hz. A fórmula para cálculo do CFL segue abaixo:

$$\text{CFL} = dx / (g / (f_{\min} * 4 * \text{Pi})) \quad (46)$$

Dx (resolução espacial em metros)

1 grau = 60 minutos

1 minuto = 1 milha

1 milha = 1,852km

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$

O que se utiliza é aproximadamente 90% do CFL para o intervalo de tempo da propagação espacial. O intervalo de tempo global (Δt_g) normalmente é definido 3 vezes maior do que o intervalo de tempo da propagação espacial e o intervalo de tempo da propagação intra-espectral, geralmente é definido metade do intervalo de tempo global ($0.5 * \Delta t_g$). O intervalo de tempo dos termos de fonte geralmente é definido entre 5 e 60 segundos, sendo o valor comumente utilizado 10 segundos.

As resoluções e os intervalos de tempo utilizados em cada grade serão descritos na parte do trabalho que discorre sobre as simulações realizadas.

Com os ficheiros de base disponíveis e o ficheiro de entrada (ww3_grid.inp) preenchido, pode ser executado o primeiro subprograma (ww3_grid). Após executada esta etapa o pré-processador de grade (ww3_grid) grava a definição do modelo (mod_def.ww3) com informações de fundo, pontos de obstrução e valores de parâmetros definindo as aproximações físicas e numéricas (WW3DG, 2019). Este ficheiro de saída é utilizado na etapa seguinte.

3.1.1.3. Definição do Campo de Forçamento

No caso deste trabalho, o forçamento do modelo foi somente o vento. Foi utilizado dados de vento de reanálises do ERA5, implementado por ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Os dados foram extraídos do Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Date Store.

O download foi realizado por meio de um script Python das componentes u e v a 10 metros de altitude em relação ao nível do mar, de 3 em 3 horas, para todo o ano de 2018, com resolução espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, dentro dos seguintes limites de domínio: 70°N , 90°W , 10°S , 0°E , este domínio coincide com o mesmo domínio da grade global.

De acordo com Cagnin et al. (2019), são necessários de três ficheiros para executar este subprograma, o forçamento (no caso o vento, em um ficheiro netCDF), a definição do modelo (mod_def.ww3) e o ficheiro (ww3_prnc.inp), onde define-se os forçamentos. Executado este

subprograma (*ww3_prnc*), o modelo fornece dois outputs: "*mod_def.ww3*" ligeiramente modificado e "*wind.ww3*", onde o forçamento (vento) fica em um formato correto para ser lido e utilizado na simulação.

3.1.2. Execução da Simulação

Uma vez obtidos os outputs exigidos pelo modelo, pode-se executá-lo (WW3DG, 2019).

Nos ficheiros (*ww3_multi.inp* ou *ww3_shel.inp*), se define o tempo de simulação e seleciona os outputs a serem calculados. Também podemos definir datas para ficheiros de reinicialização (*restart files*), caso deseje posteriormente ampliar a janela de simulação, este ficheiro nos permite iniciar uma nova simulação com as condições iniciais já estabelecidas, ou seja, com o modelo já "aquecido". No caso de múltiplas grades pode-se definir diferentes forçamentos para cada grade.

Neste trabalho foi realizado a simulação de ondas para todo o ano de 2018, com forçamento único de vento para todas as grades, a simulação foi realizada com início "frio", os outputs escolhidos para posterior análise foram a altura significativa de onda (H_s), Período de Pico (T_p), Período Médio (T_m) e Direção Média (θ).

Executado o (*ww3_shel* ou *ww3_multi*) o subprograma gera o ficheiro de resultado "*out_grid.ww3*" e ficheiros de reinicialização (*restart files*).

A Figura 4 representa as etapas e os ficheiros necessários para execução da simulação em um esquema de grade única, extraído do trabalho de Cagnin et al. (2019). A Figura 5, representa o esquema de múltiplas grades utilizado neste trabalho.

A rotina de inicialização do modelo (W3INIT), inclui a configuração de parte do sistema de *input/output*, inicializando o gerenciando o tempo interno, processando o arquivo de definição de modelo (*mod_def.ww3*), processando as condições iniciais (*restart.ww3*), preparando os *outputs* do modelo e calculando os parâmetros dependentes da grade. Sendo o modelo compilado para um ambiente MPI, toda a comunicação necessária para os cálculos e *outputs* é determinada e inicializada (o modelo utiliza uma persistente comunicação MPI integrada) (WW3DG, 2019).

Após algumas verificações iniciais, a rotina (W3WAVE), interpola ventos e correntes, atualiza as concentrações de gelo e os níveis de água (se existentes), propaga o campo de onda e aplica os termos de fonte selecionados para uma série de intervalos de tempo. O intervalo de tempo interno é definido pelo intervalo para o qual os cálculos devem ser executados e pelos tempos de saída (*outputs*) solicitados. No final dos cálculos, a rotina fornece ao programa de chamada os campos solicitados de dados de onda (WW3DG, 2019).

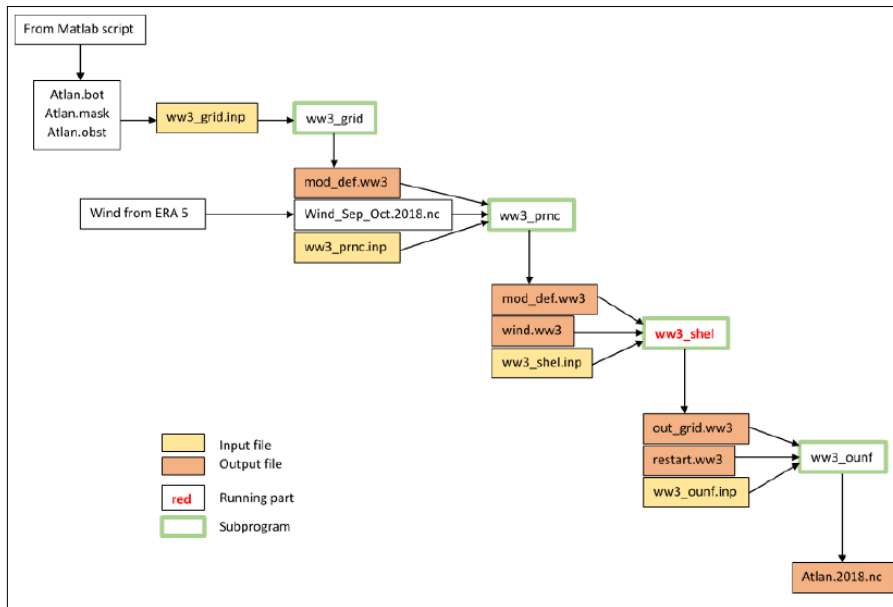


Figura 4. Exemplo do esquema para execução do modelo de grade única, extraído do trabalho de Cagnin et al. (2019).

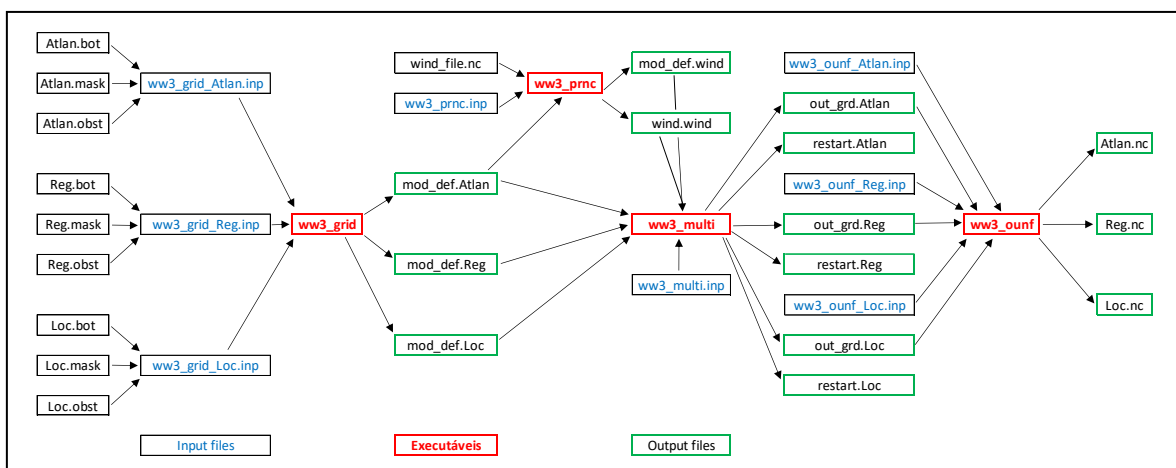


Figura 5. Exemplo do esquema para execução do modelo de múltiplas grades utilizado neste trabalho.

3.1.3. Pós-Processo

Como pode ser observado na Figura 4 e na Figura 5, após executar a simulação (subprogramas: `ww3_shel` ou `ww3_multi`) o modelo não grava um output padrão, segundo WW3DG (2019), isso seria inconveniente pois o WAVEWATCH III é parte de um modelo integrado. Com isso, vários pós-processadores para outputs estão disponíveis, dentre eles, pós-processadores para grade (`ww3_outf` e `ww3_ounf`) e para pontos (`ww3_outp` e `ww3_ounp`).

Basicamente o pós-processador converte os resultados do modelo (`out_grid.ww3`) em um o ficheiro que pode ser mais facilmente lido por outros programas. No caso deste trabalho, foi utilizado o pós-processador (`ww3_ounf`), este subprograma converte o resultado em um ficheiro netCDF. Para isso foi necessário preencher o ficheiro (`ww3_ounf.inp`). Neste ficheiro pode-se seleccionar os outputs e o tempo de saída que se deseja. Foram seleccionados os mesmos outputs escolhidos na etapa anterior: altura significativa de onda (Hs), Período de Pico (Tp), Período Médio

(T_m) e Direção Média (θ) e requerido um tempo de saída para outputs de 3 em 3 horas. Também pode-se separar os outputs por hora, diariamente, mensalmente e anualmente. Para melhor analisar e apresentar os resultados, os outputs foram agrupados mensalmente e anualmente.

Com os ficheiros netCDF foi analisado os dados gerados pela simulação por meio do Matlab, onde foram gerados gráficos e vídeos, que serão apresentados nos resultados.

3.2. Validação / Calibração

Um modelo numérico funciona de acordo com as equações que o regem. Muitas vezes, para tentar descrever a realidade por meio de equações envolve uma infinidade de fatores e complexidade nas mesmas, portanto, as equações frequentemente são simplificadas e utilizam aproximações, desde modo, é necessário quantificar o quanto o modelo está próximo da realidade.

De acordo com Amrutha et al. (2016), a verificação dos outputs do modelo é o elemento mais importante para ganhar confiança sobre os parâmetros simulados do modelo. É muito importante do ponto de vista operacional quantificar os erros associados a um modelo numérico.

Portanto, averiguar se o modelo numérico está próximo da realidade é essencial para dar credibilidade ao modelo. Para isso, se faz uma validação por meio de comparações dos dados simulados com dados observados.

Para tal, neste trabalho os dados simulados pelo modelo foram comparados com dados observados da bóia Alfredo Ramalho e também com o dados de reanálises do ERA5.

Para os dados de reanálises do ERA5 foi realizado download por meio de um script Python da altura significativa de onda, período de pico, período médio e direção média, de 3 em 3 horas, para todo o ano de 2018, com resolução espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (até o momento, a maior resolução espacial do ERA5 para ondas oceânicas). Contudo, esta resolução nos dados do ERA5 nem sempre coincide com a resolução espacial dos dados simulados pelo modelo e nem com a localização da bóia. Portanto, quando isto foi o caso, foi selecionado para a análise o ponto na grade do modelo que está mais próximo das coordenadas dos dados do ERA5, bem como, o ponto do ERA5 que está mais próximo a localização da bóia.

Os dados da bóia Alfredo Ramalho foram extraídos do Observatório Oceanográfico da Marxe Ibérica, disponibilizado no seguinte endereço: <https://raia.inesctec.pt>. Foi realizado download da altura significativa de onda, período de pico, período médio e direção média, para cada hora, para todo o ano de 2018. Os pontos nas grades do modelo também não coincidem com a localização da boia, portanto, foi selecionado o ponto na grade do modelo que está mais próximo da localização da boia (17,5 km). Já o ponto do ERA5 mais próximo da localização da boia, dista 18,6 km da mesma.

A localização da bóia Alfredo Ramalho, as coordenadas dos pontos de análise do ERA5 e dos dados simulados, serão apresentados nos resultados.

Para a validação do modelo os seguintes indicadores estatísticos foram calculados entre os resultados simulados, dados da bóia e dados de reanálises:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{m,i} - x_{o,i})^2} \quad (47)$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{m,i} - x_{o,i})}{n} \quad (48)$$

$$SI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_{m,i} - \bar{x}_m) - (x_{o,i} - \bar{x}_o)]^2}{\sum_{i=1}^n x_{o,i}^2}} \quad (49)$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{m,i} - \bar{x}_m)(x_{o,i} - \bar{x}_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{m,i} - \bar{x}_m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{o,i} - \bar{x}_o)^2}} \quad (50)$$

onde, m são dos dados simulados pelo modelo e o , são os dados observados.

4. Simulações Realizadas, Resultados e Discussão

As diferentes grades neste trabalho foram intituladas da seguinte maneira: grade global, intitulada “Atlan”; grade regional, intitulada “Reg”; e grade local, intitulada “Loc”.

Inicialmente o modelo foi executado somente para um mês (janeiro de 2018), para testar as diferentes resoluções das grades e os intervalos de tempo utilizados, para assim avaliar o comportamento do modelo.

4.1. Simulações Realizadas e Resultados Obtidos

A primeira simulação compreendeu apenas duas grades, a grade Reg aninhada na Atlan.

A grade Atlan foi simulada com resolução espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (55,560 km) com os seguintes intervalos de tempo: intervalo de tempo global (Δt_g) = 7171 segundos; intervalo de tempo da propagação espacial = 2390 segundos; intervalo de tempo da propagação intra-espectral = 3585 segundos; e intervalo de tempo da integração dos termos de fonte = 10 segundos.

A grade Reg foi simulada com resolução espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (27,780 km) com os seguintes intervalos de tempo: intervalo de tempo global (Δt_g) = 3585s; intervalo de tempo da propagação espacial = 1195s; intervalo de tempo da propagação intra-espectral = 1792s; e intervalo de tempo da integração dos termos de fonte = 10s.

A Figura 6 mostra os resultados dessa primeira simulação para a altura significativa de onda (H_s) e direção média na grade Atlan, entre os dias 2 a 9 do mês de janeiro. O começo da simulação aparentemente corre bem, mas quando as ondas começam a sofrer influência das zonas costeiras ocorre instabilidade numérica na simulação.

Manteve-se a mesma resolução espacial nas grades e reduziu-se os intervalos de tempo da grade Atlan para: $\Delta t_g = 2400$ s, propagação espacial = 480s, propagação intra-espectral = 300s e integração dos termos de fonte = 10s; e os intervalos de tempo para a grade Reg para: $\Delta t_g = 1200$ s; propagação espacial = 200s; propagação intra-espectral = 50s; e integração dos termos de fonte = 10s.

Com estes novos intervalos de tempo utilizados, obteve-se estabilidade numérica em ambas as grades nas respectivas resoluções simuladas. A Figura 7 mostra os resultados da simulação para (H_s) e direção média de onda na grade Atlan e Reg entre os dias 3 e 9 do mês de janeiro.

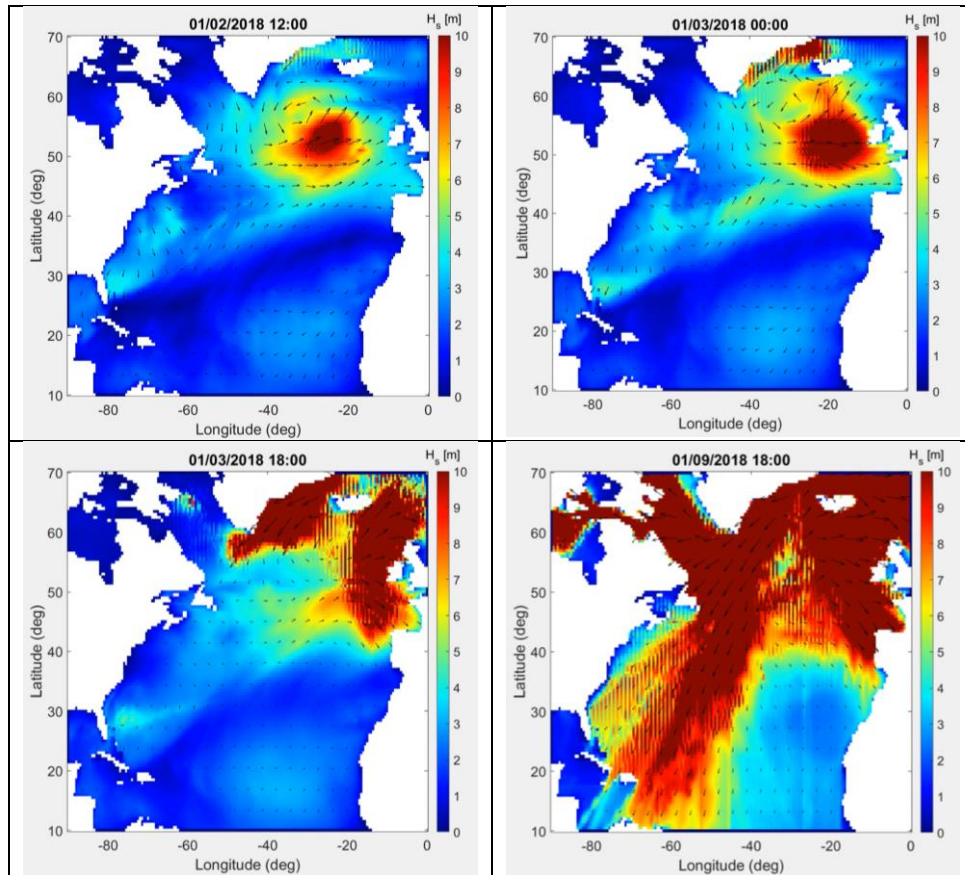


Figura 6. Resultados da simulação para H_s e direção média na grade Atlan, as datas nas partes superiores das figuras correspondem as datas e estão no formato: mês/dia/ano/hora.

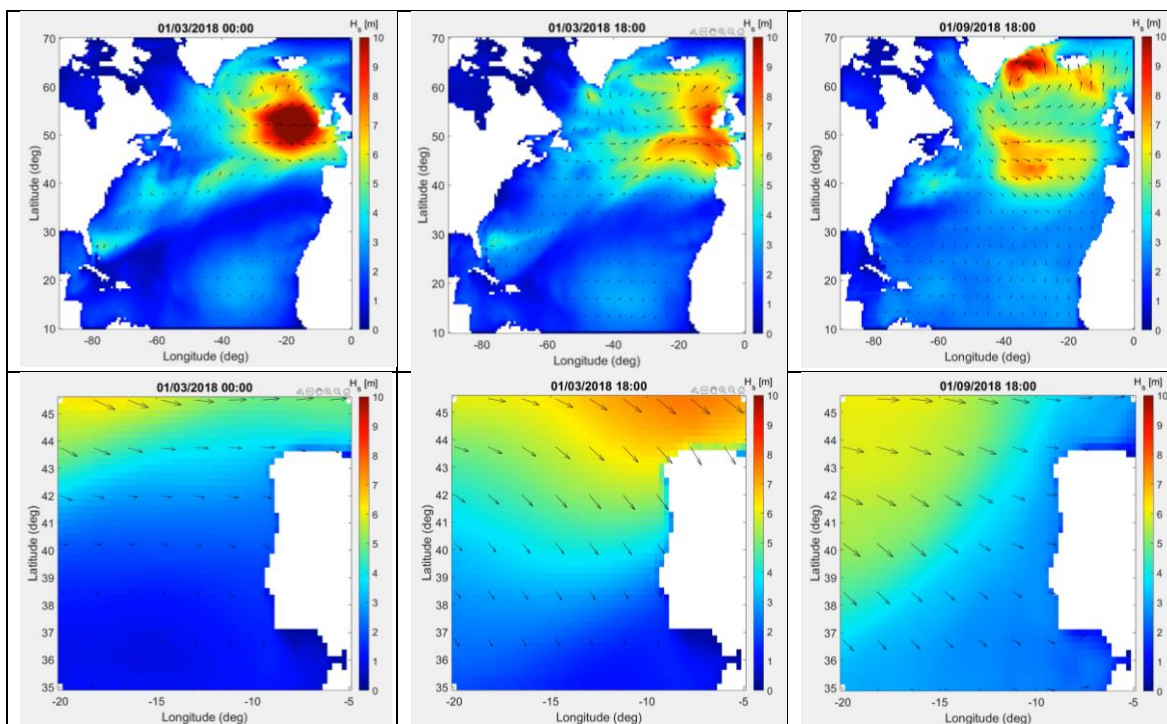


Figura 7. Resultados da simulação para H_s e direção média de onda na grade Atlan (porção superior da figura) e Reg (porção inferior da figura) entre os dias 3 e 9 do mês de janeiro.

Ao obter-se a estabilidade numérica nas grades global (Atlan) e regional (Reg) foi realizado a simulação com a grade local (Loc) aninhada na grade regional.

A grade Loc foi simulada com resolução espacial de $0.005^\circ \times 0.005^\circ$ (555,6 metros) com os seguintes intervalos de tempo: $\Delta t_g = 71s$; propagação espacial = 23s; propagação intra-espectral = 35s; e integração dos termos de fonte = 10 segundos. O início da simulação parece correr bem, mas logo ocorre instabilidade numérica, como pode ser observado na Figura 8, onde mostra a simulação realizada para H_s e direção média de onda entre os dias 2 e 3 do mês de janeiro.

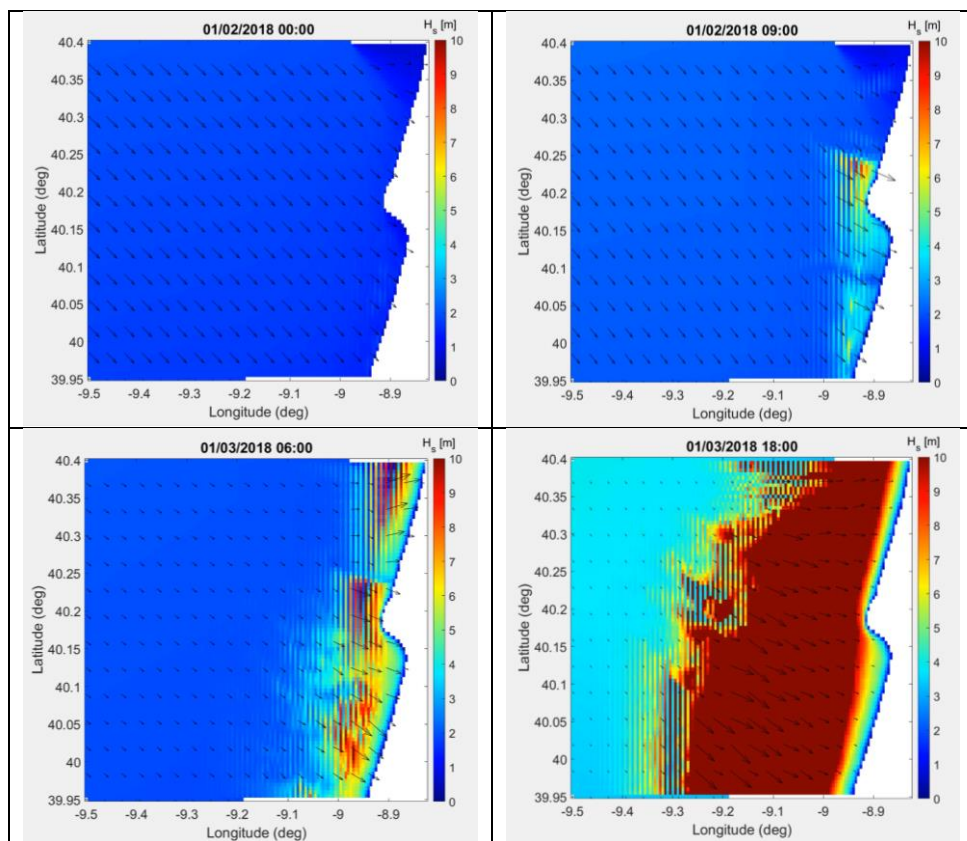


Figura 8. Instabilidade numérica na simulação da grade local.

Como pode-se observar na Figura 8 a instabilidade numérica se deflagra na zona costeira. De acordo com WW3DG (2019), os componentes de ondas longas geralmente transportam energia significativa em direção à costa, onde sua energia é dissipada de alguma maneira. Desde modo, o efeito da refração pode se tornar extremo para ondas longas em águas muito rasas. Possivelmente foi o mesmo que ocorreu com a primeira simulação na grade Atlan, como pode-se observar na Figura 6, a instabilidade na simulação começa na zona costeira

Para garantir a estabilidade numérica, as velocidades de refração são filtradas, conforme a Eq. (29). Esse filtro suaviza a inclinação do fundo para alguns componentes de onda de baixa frequências, onde suprime a refração em casos de mudança repentina da topografia fundo. No entanto, o impacto dessa filtragem é reduzido quando são utilizados intervalos de tempo menores de propagação intra-espectral, pois, permitem maiores efeitos de refração dentro das restrições de estabilidade do esquema, uma vez que são calculados antes do filtro ser aplicado. Portanto, é prudente testar intervalos de tempo intraespectral muito menores para avaliar o impacto dessa filtragem (WW3DG, 2019).

Segundo WW3DG (2019), o intervalo de tempo de refração depende de quão forte pode ser a corrente na grade, no caso sem correntes ou velocidade da corrente fraca, geralmente utiliza-se metade do Δt_g , mas no caso de fortes velocidades de corrente, pode ser diminuído para 10 vezes menos o valor de Δt_g .

Desde modo os intervalos de tempo utilizados foram modificados para: $\Delta t_g = 60s$; propagação espacial = 20s; propagação intra-espectral = 6s; e integração dos termos de fonte = 10 segundos. Contudo, a instabilidade numérica se manteve, a Figura 9, mostra as simulações

realizadas na grade local entre os dias 1 e 6 de janeiro, para H_s e direção média de onda, para estes intervalos de tempo alterados.

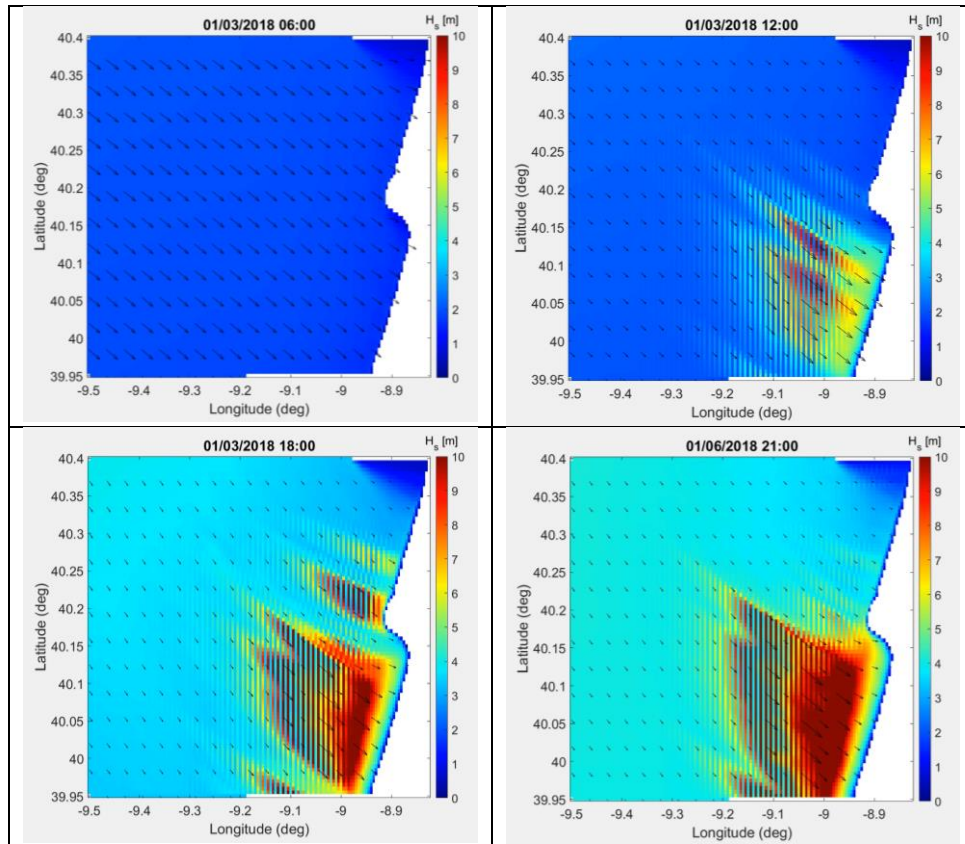


Figura 9. Instabilidade numérica na simulação da grade local.

As maiores ondas geralmente estão associadas a maiores comprimentos e período e, portanto, sentem mais a influência do fundo. Supostamente, os intervalos de tempo calculados para esta grade (em especial o intervalo de tempo intra-espectral, que computa os efeitos máximos da refração e mudanças residuais do número de onda induzido pela corrente), ainda não conseguem contabilizar esses efeitos de uma forma precisa e estável para as maiores ondas.

Desta maneira, os intervalos de tempo foram novamente alterados na grade local, desta vez foram utilizados: $\Delta t_g = 30s$; propagação espacial = 10s; propagação intra-espectral = 3s; e integração dos termos de fonte = 10 segundos.

Com essas novas configurações dos intervalos de tempo conseguiu-se atingir a estabilidade numérica na grade local, conforme pode-se observar na Figura 10, onde mostra as simulações realizadas na grade local para H_s e direção média de onda entre os dias 3 e 22 do mês de janeiro.

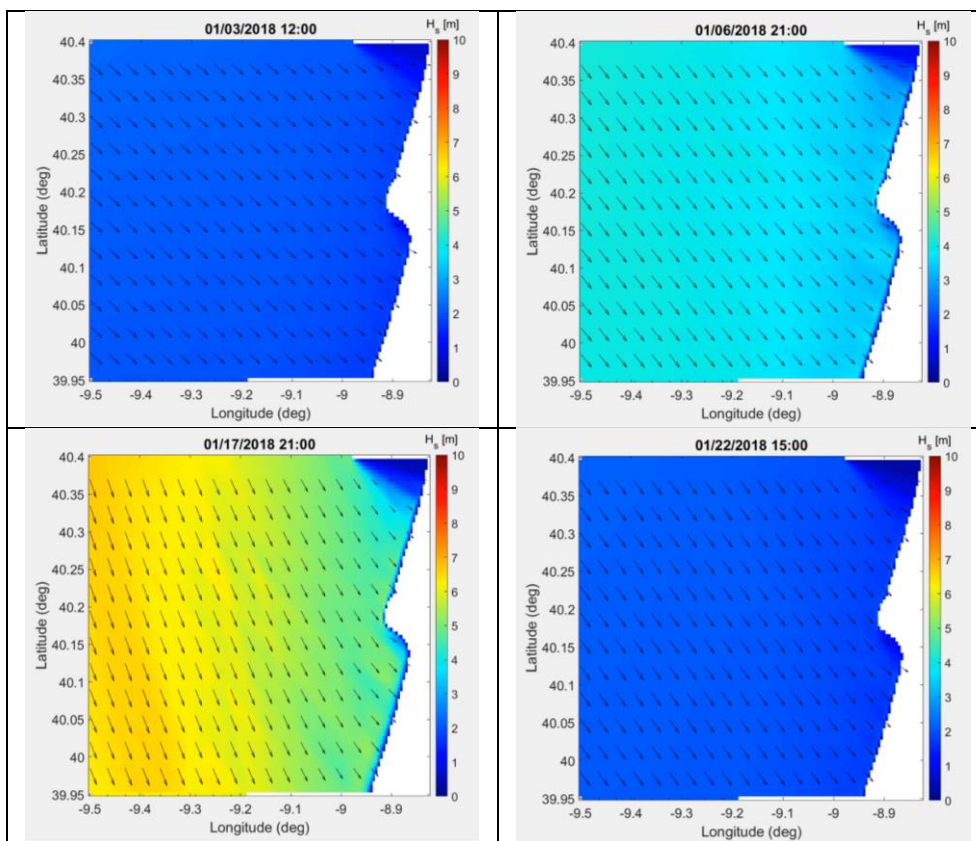


Figura 10. H_s e direção média na grade local (Loc) para alguns dias do mês de janeiro de 2018.

Como pode-se observar na Figura 10 a estabilidade numérica foi alcançada na grade local, porém, nota-se uma obstrução nas porções inferior direita e superior direita da grade. Esta obstrução acaba por causar uma zona de sombra conforme a direção da ondulação, como destacado na Figura 11.

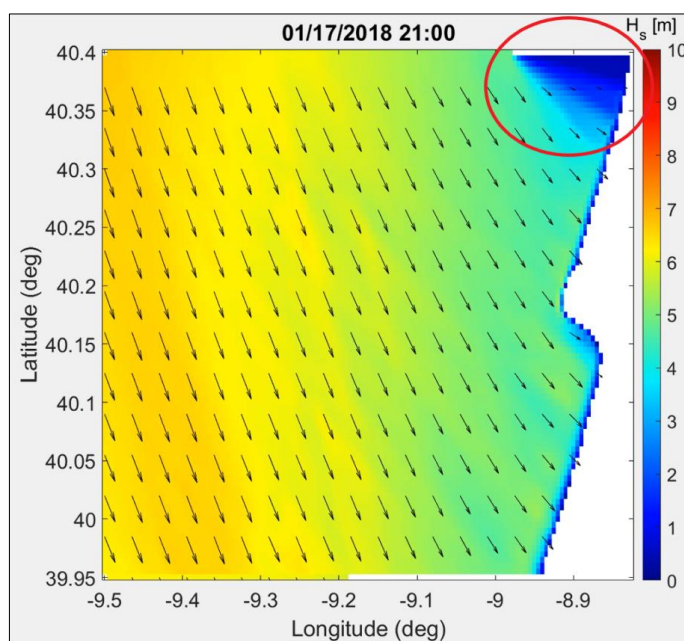


Figura 11. Obstrução na grade local causando uma zona de sombra.

Esta obstrução é causada pelo aninhamento da grade local (Loc) na grade regional (Reg). Pela grade regional ter uma resolução bem menor do que a grade local, é como se parte da grade local estivesse inserida dentro da porção terrestre da grade regional, como pode ser observado na Figura 12 e na Figura 13.

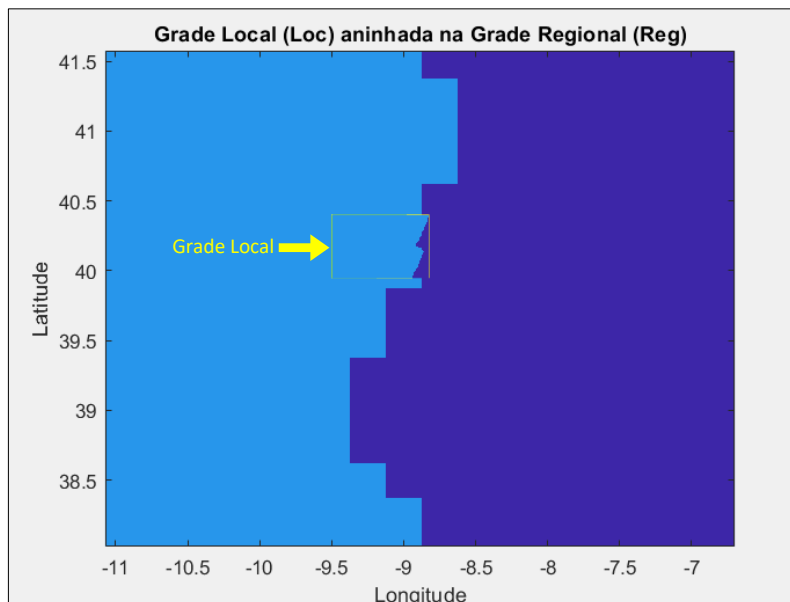


Figura 12. Grade local aninhada na grade regional.

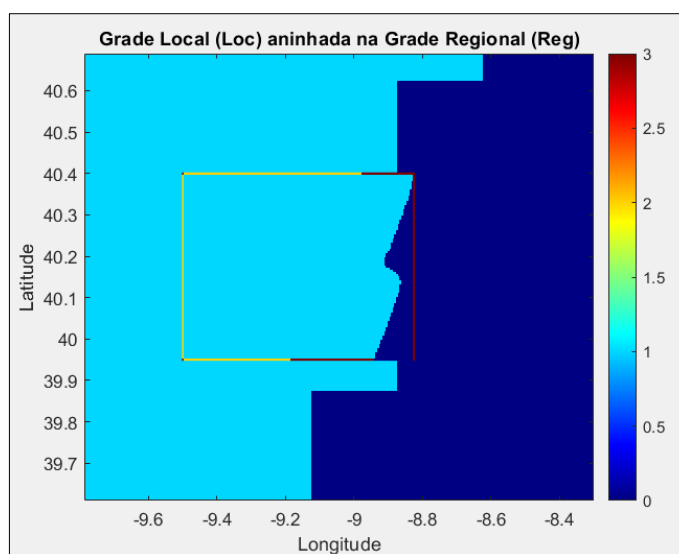


Figura 13. Grade local aninhada na grade regional: pontos em terra (0); pontos em água (1); pontos de fronteira com a grade aninhada (2); e pontos ignorados na computação (3).

Na etapa da geração das grades, o ficheiro (.mask) distingue os pontos em terra como (0); pontos em água como (1); pontos de fronteira com a grade aninhada como (2); e pontos ignorados na computação como (3), como pode ser observado pelas cores na Figura 13.

Esta diferença entre as resoluções da grade regional e local faz o modelo contabilizar os pontos da grade local que estão inseridos dentro da porção terrestre da grade regional ou sobre

seu efeito de obstrução, como pontos ignorados pela computação, portanto, ocorre este efeito de obstrução.

Este problema foi parcialmente corrigido aumentando a resolução da grade regional. Foi utilizado uma resolução espacial de $0.0625^\circ \times 0.0625^\circ$. Também foi aumentado a resolução espacial grade global para $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. As configurações das 3 grades são as seguintes:

Grade Atlan: resolução espacial $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (27,78 km), com intervalos de tempo: $\Delta t_g = 1200$ segundos; propagação espacial = 200s; propagação intra-espectral = 50s; e integração dos termos de fonte = 10s.

Grade Reg: resolução espacial $0.0625^\circ \times 0.0625^\circ$ (6,945 km), com intervalos de tempo $\Delta t_g = 750$ s; propagação espacial = 250s; propagação intra-espectral = 75s; e integração dos termos de fonte = 10s.

Grade Loc: resolução espacial $0.005^\circ \times 0.005^\circ$ (555,6 metros), com intervalos de tempo $\Delta t_g = 30$ s; propagação espacial = 10s; propagação intra-espectral = 3s; e integração dos termos de fonte = 10s.

A Figura 14 mostra as simulações realizadas nas três grades para Hs e direção média de onda entre os dias 5 e 17 do mês de janeiro.

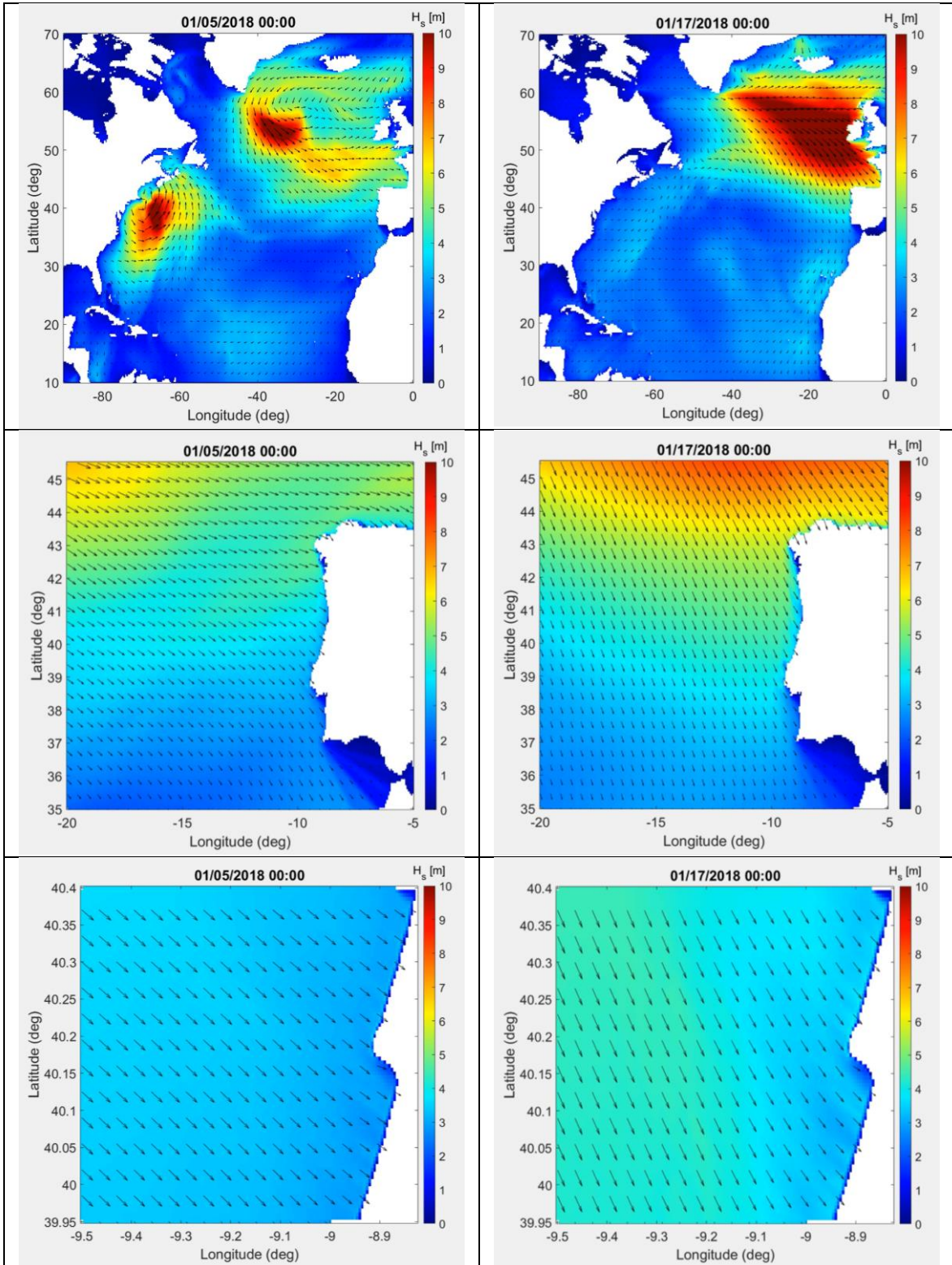


Figura 14. Resultados da simulação para H_s e direção média de onda na grade Atlan (porção superior da figura), Reg (porção central da figura) e Loc (porção inferior da figura) entre os dias 5 e 17 do mês de janeiro.

As porções superior direita e inferior direita da grade local ainda apresentam uma pequena obstrução gerada pelos pontos ignorados pelo modelo no aninhamento das grades, porém, muito

menos acentuado do que anteriormente. Desta forma, para analisar os *outputs* do modelo nesta grade, recomenda-se selecionar pontos na grade que não sofrem influência desta obstrução.

Nota-se claramente que maior resolução nas grades trazem maior detalhe, pode-se perceber claramente ao comparar a Figura 7 com a Figura 14.

Na grade global da Figura 14 consegue-se ver o Estreito de Gibraltar, parte do Mar Mediterrâneo, algumas ilhas como Madeira e Canárias, já na Figura 7, com a resolução utilizada o modelo não conseguiu descrever essas morfologias.

Na grade regional da Figura 14 consegue-se notar com mais detalhe as zonas no litoral mais expostas e mais abrigadas à ondulação. Para as direções de ondulação que constam nas figuras 7 e 14, as zonas mais abrigadas como a porção sul do Algarve, Golfo de Cadiz, porção sul de Lisboa, Setúbal e algumas locais da Galícia são identificáveis na Figura 14, já na Figura 7 não se consegue notar esses efeitos com tanto detalhe.

A saliência no litoral na grade local é o Cabo Mondego. Nota-se que ondulação do quadrante noroeste forma uma zona de sombra logo ao sul do cabo. Pode-se notar pela Figura 15 que a zona ao sul onde a obstrução do cabo tem influência, a altura significativa é menor em relação a porção norte do cabo. Em uma grade de menor resolução não se conseguiria notar este efeito. Também é possível notar a mudança no ângulo da direção da ondulação próximo a costa, evidenciando que o modelo descreve os efeitos da refração.

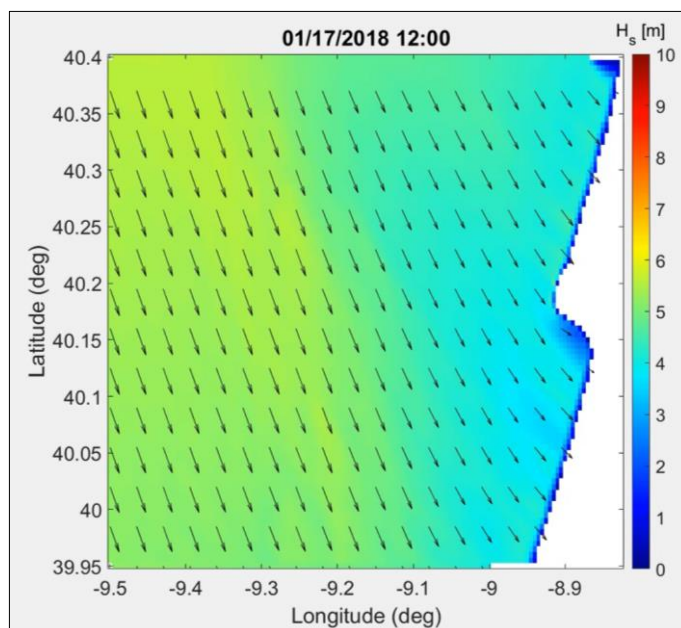


Figura 15. Zona de sombra causada pela obstrução do cabo na grade local.

Como anteriormente citado por Bertotti e Cavaleri (2009), o uso de um modelo global implica uma resolução relativamente grosseira, geralmente insuficiente para áreas caracterizadas perto de costas, onde os detalhes do litoral introduzem características muito pequenas para serem vistas em um modelo global. Desde modo, é de se esperar uma melhoria em um modelo de área limitada, trabalhando com alta resolução e aninhado no de grande escala, pois, o modelo aninhado

cria detalhes, podendo até haver diferentes evoluções e comportamentos em relação ao modelo de maior escala, caso algum tipo de evento for limitado à escala aninhada considerada.

Os efeitos dos detalhes da linha de costa descritos anteriormente nas grades regional e local, são efeitos limitados a estas grades, concordando assim, com o conceito de Bertotti e Cavaleri (2009) supracitado.

Após ter simulado para o mês de janeiro de 2018, para estas mesmas configurações das grades foi simulado para todo o ano de 2018. Para isso foi solicitado ao *HPC Argus*: 2 núcleos (*nodes*), 12 Processadores e 4 GB por *CPU (Central Process Unit)*. Com estas configurações das grades e com estes recursos solicitados ao Argus, levou 17 dias, 4 horas, 28 minutos e 30 segundos para concluir um ano de simulação.

4.2. Comparação de dados (validação/calibração)

Para comparação dos dados simulados com dados observados, os resultados simulados pelo modelo foram comparados com a bóia Alfredo Ramalho e dados de reanálises do ERA5. A bóia Alfredo Ramalho situa-se dentro do domínio das grades Atlan e Reg, mas encontra-se fora do domínio da grade Loc, portanto os resultados da grade Loc foram apenas comparados com os dados de reanálises.

Foi selecionado o ponto na grade do modelo e dados de reanálises nas coordenadas mais próximos da localização da bóia. Pela grade Reg ter maior resolução do que a grade Atlan, o ponto da grade Reg é o que mais se aproxima da localização da bóia, portanto foi selecionado o ponto desta grade para a comparação com a bóia. A Figura 16 mostra a localização da bóia, as coordenadas do ponto de análise selecionado na grade regional e as coordenadas dos dados de reanálise.

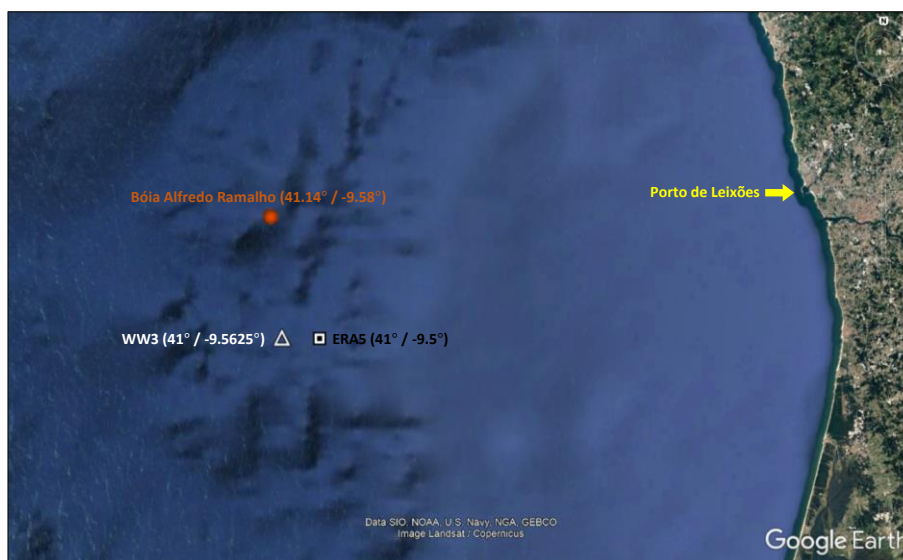


Figura 16. A esfera laranja representa a localização da bóia Alfredo Ramalho, o quadrado representa a localização dos dados de reanálises e o triângulo representa o ponto selecionado na grade regional (Reg) do WW3, todos encontram-se dentro do domínio da grade regional e global, as coordenadas estão em graus decimais.

Como o domínio da grade Loc não engloba a boia Alfredo Ramalho, para a análise dos resultados dos dados simulados pelo modelo na grade Loc, foi selecionado um ponto na grade Loc e extraído dados de reanálises nas mesmas coordenadas. A Figura 17 mostra a localização do ponto de análise selecionado.

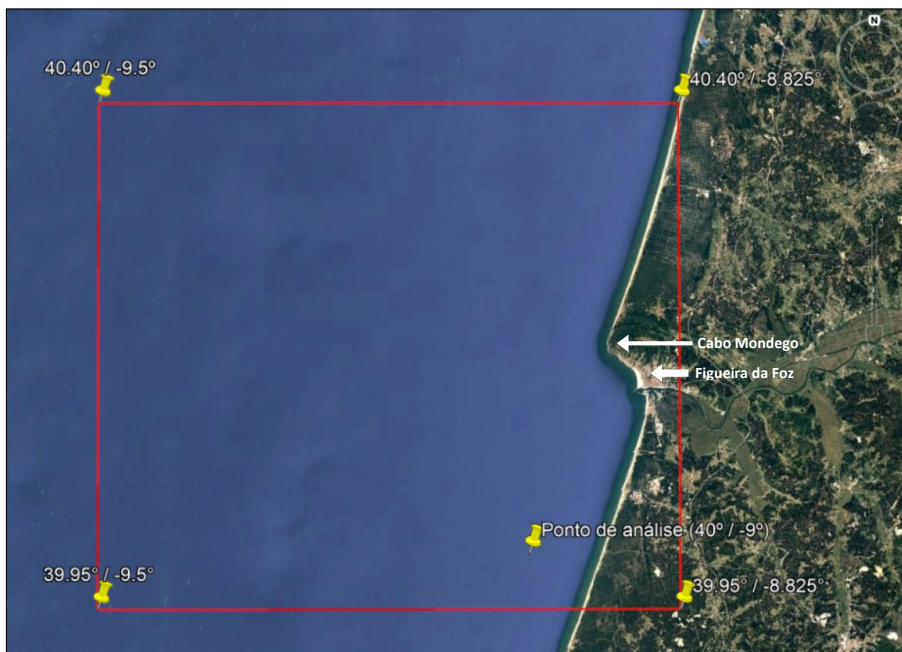


Figura 17. Ponto de análise no domínio da grade local (40°N e -9°W), coordenadas em graus decimais.

Como foi realizado simulações nas mesmas grades em diferentes resoluções, foi efetuado a comparação de Hs entre as diferentes resoluções na grade global e na grade regional.

Cagnin et al. (2019), ao comparar os resultados de suas simulações no WW3 com diferentes resoluções (0.5° e 0.25°) enuncia que a resolução de (0.25°) se aproxima melhor dos dados da boia do que a resolução de (0.5°). Já Melo et al. (2008), em uma análise entre suas grades com diferentes resoluções, afirma que os resultados foram estatisticamente similares. Mentaschi et al. (2015), quando aumentou a resolução de 20km para 10km, referem que melhorou o desempenho da altura significativa de onda e do período médio.

A Figura 18 e a Figura 19, mostram a comparação de Hs nas diferentes resoluções utilizadas nas grades global e regional, para o mês de janeiro de 2018 nas coordenadas (41° e -9.5°).

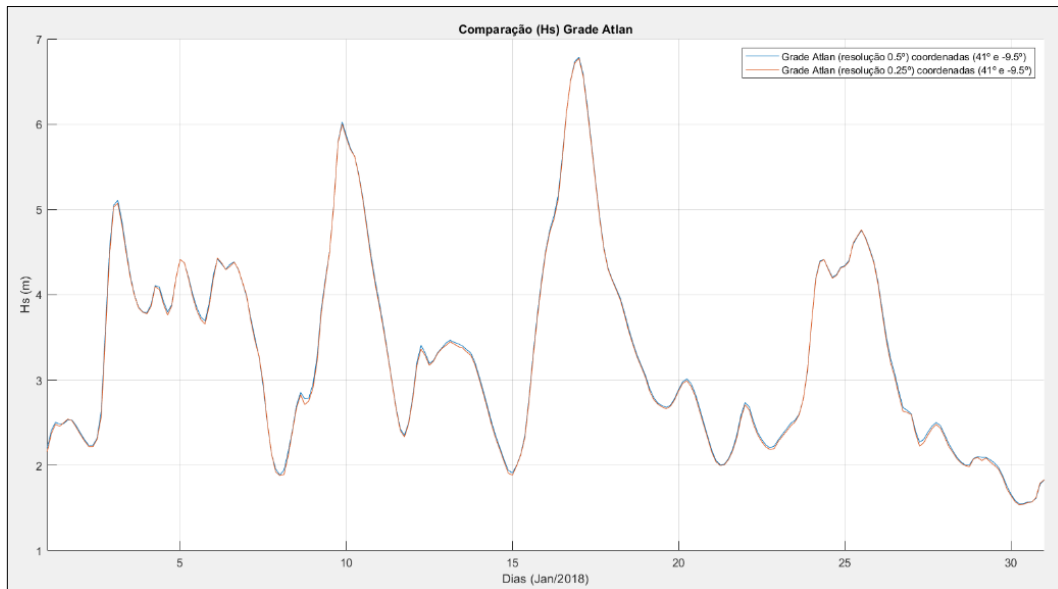


Figura 18. Comparação de Hs na grade Atlan com diferentes resoluções.

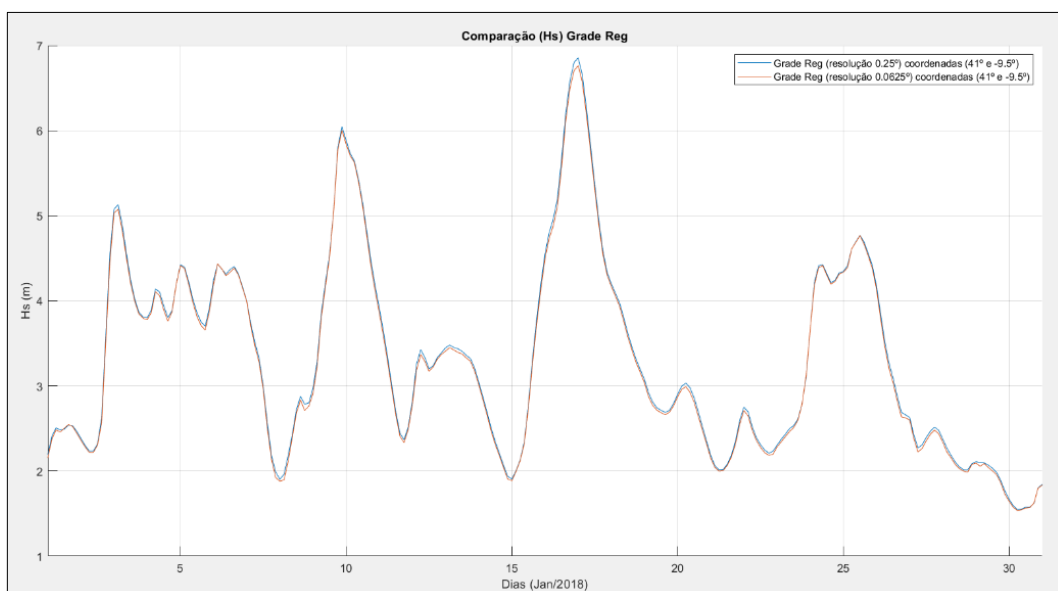


Figura 19. Comparação de Hs na grade Reg com diferentes resoluções.

Percebe-se pela Figura 18 e pela Figura 19 que as diferenças de Hs entre as diferentes resoluções entre as mesmas grades são menores do que 0.25 metros, não alterando significativamente os dados simulados de Hs.

Após a comparação dos dados entre as mesmas grades, foi comparado os resultados do modelo entre as diferentes grades. A Figura 21 é uma comparação de Hs nas diferentes grades (Atlan e Reg) nas resoluções 0.25° e 0.0625° respectivamente, nas coordenadas (41° e -9.5°) para todo o ano de 2018.

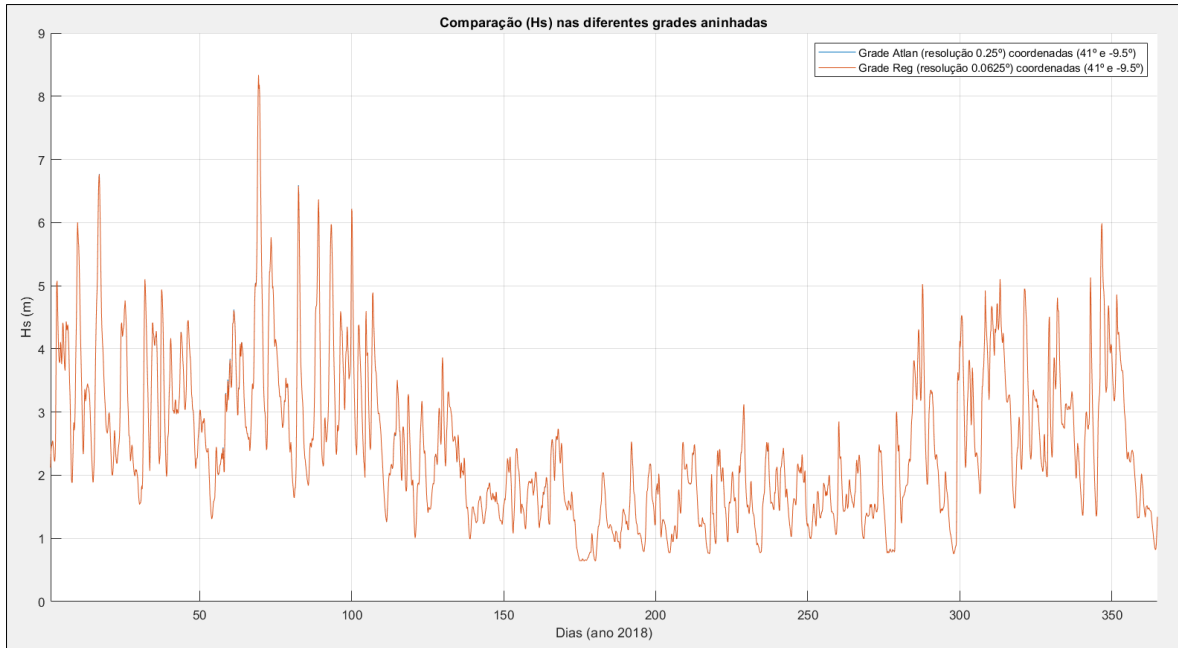


Figura 20. Comparação de Hs nas diferentes grades para o ano de 2018.

Nota-se pela Figura 20 que praticamente não existe diferença nos dados simulados entre a grade Atlan e a grade Reg.

A Figura 21 é uma comparação de Hs nas diferentes grades (Atlan, Reg e Loc) nas resoluções 0.25°, 0.0625° e 0.005° respectivamente, nas coordenadas (40° e -9°) para todo o ano de 2018.

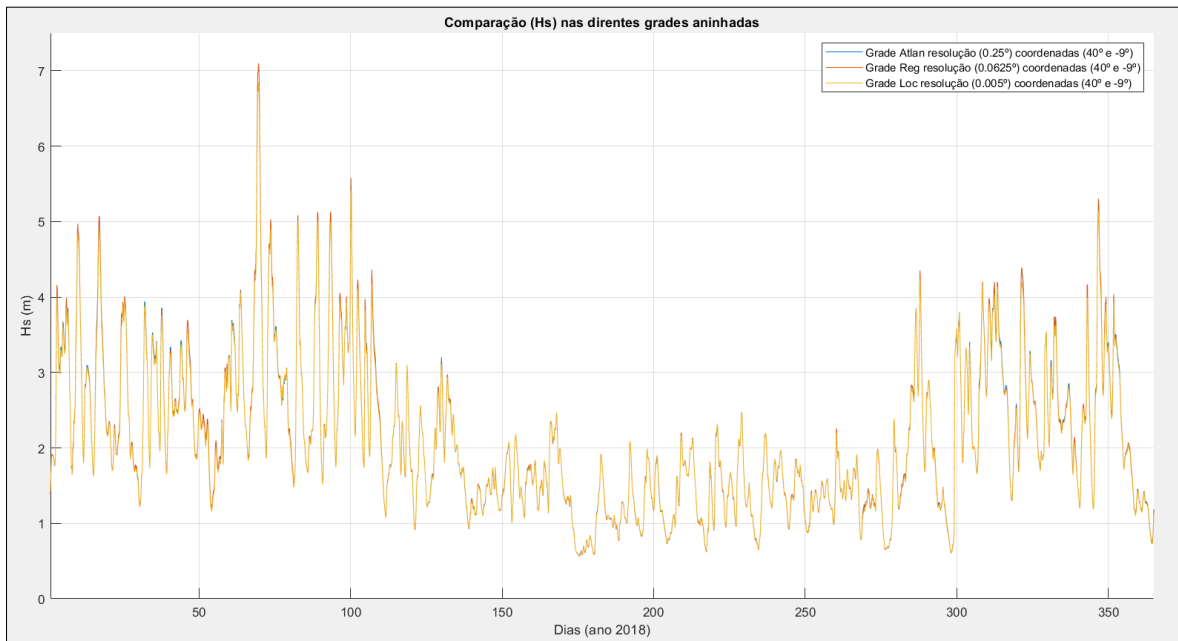


Figura 21. Comparação de Hs nas diferentes grades para o ano de 2018.

Nota-se pela Figura 21 que a diferença nos dados simulados entre as grades é no máximo 0.25 m.

Após a comparação de Hs entre grades e resoluções das mesmas, os dados foram comparados com a bóia Alfredo Ramalho e dados de reanálises. Mesmo os resultados dos dados simulados pelo modelo não apresentarem diferenças muito significativas entre as grades e resoluções, para a comparação com a bóia Alfredo Ramalho, foi selecionado o ponto na grade Reg com resolução (0.0625°), porque é o ponto que mais se aproxima da localização boia.

A Tabela 1 mostra a comparação por meio dos indicadores estatísticos dos resultados simulados na grade Reg nas coordenadas (41°N e -9.5625°W) com os dados observados pela bóia Alfredo Ramalho.

Tabela 1. Indicadores estatísticos entre os resultados simulados na grade Reg nas coordenadas (41°N e -9.5625°W) com os dados observados pela bóia Alfredo Ramalho.

	RMSE	BIAS	SI	Coef Corr
Hs (m)	0.3509	-0.0543	0.1270	0.9687
Tp (s)	1.7495	0.2772	0.1562	0.8006
Tm (s)	2.1433	1.9910	0.1121	0.9103
Direção Média (°)	16.6905	2.1101	0.0536	0.7948

A Figura 22 mostra os *Scatter Plots* de Hs, Tp, Tm e Direção Média entre os resultados simulados na grade Reg nas coordenadas (41°N e -9.5625°W) e os dados observados pela bóia Alfredo Ramalho.

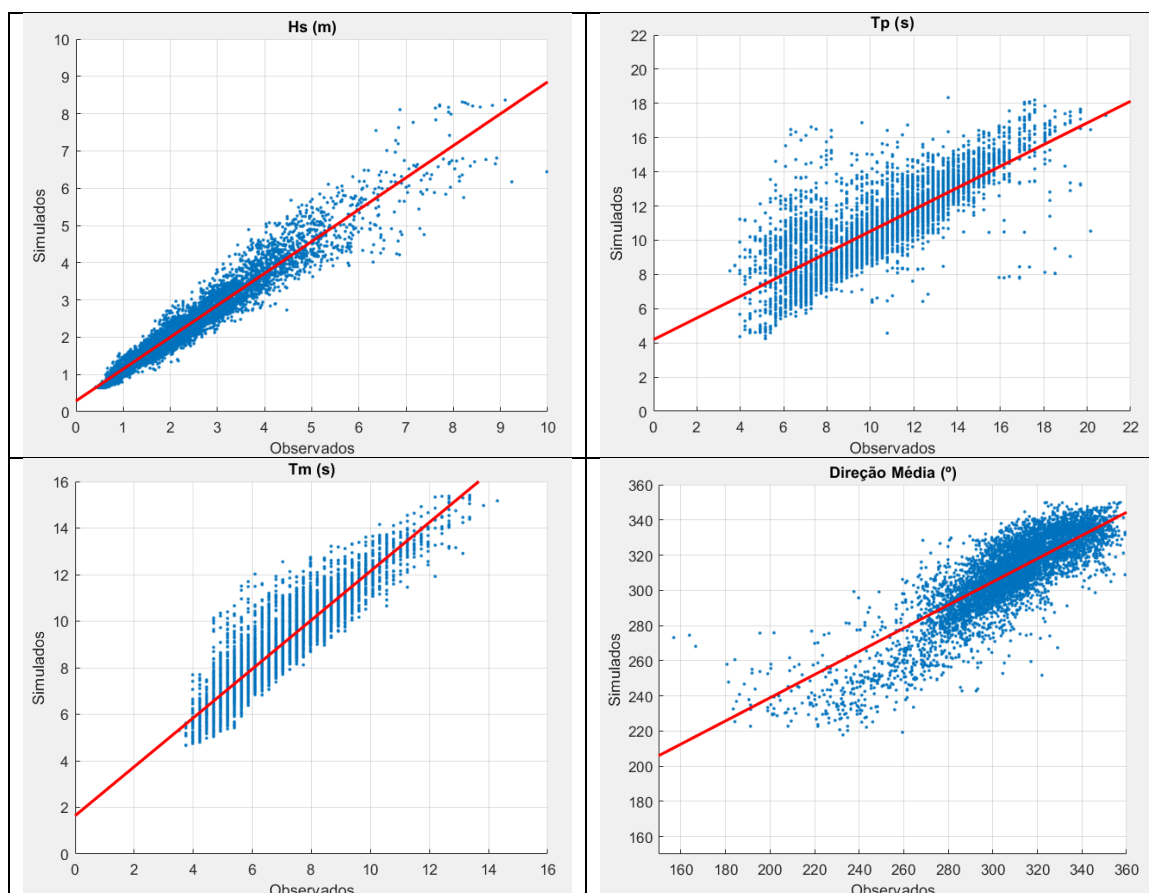


Figura 22. Scatter Plots de Hs, Tp, Tm e Direção Média entre os resultados simulados na grade Reg nas coordenadas (41°N e -9.5625°W) e os dados observados pela bóia Alfredo Ramalho.

A Tabela 2 mostra a comparação por meio dos indicadores estatísticos dos resultados simulados na grade Loc nas coordenadas (40°N e -9°W) com os dados de reanálises nas mesmas coordenadas.

Tabela 2. Indicadores estatísticos entre os resultados simulados na grade Loc nas coordenadas (40°N e -9°W) e dos dados de reanálises nas mesmas coordenadas.

	RMSE	BIAS	SI	Coef Corr
Hs (m)	0.2073	0.0778	0.0865	0.9807
Tp (s)	1.2077	-0.2955	0.0995	0.8884
Tm (s)	0.5820	-0.2203	0.0561	0.9676
Direção Média (°)	4.9787	-2.6123	0.0138	0.9811

A Figura 23 mostra os *Scatter Plots* de Hs, Tp, Tm e Direção Média entre os resultados simulados na grade Loc nas coordenadas (40°N e -9°W) e os dados de reanálises nas mesmas coordenadas.

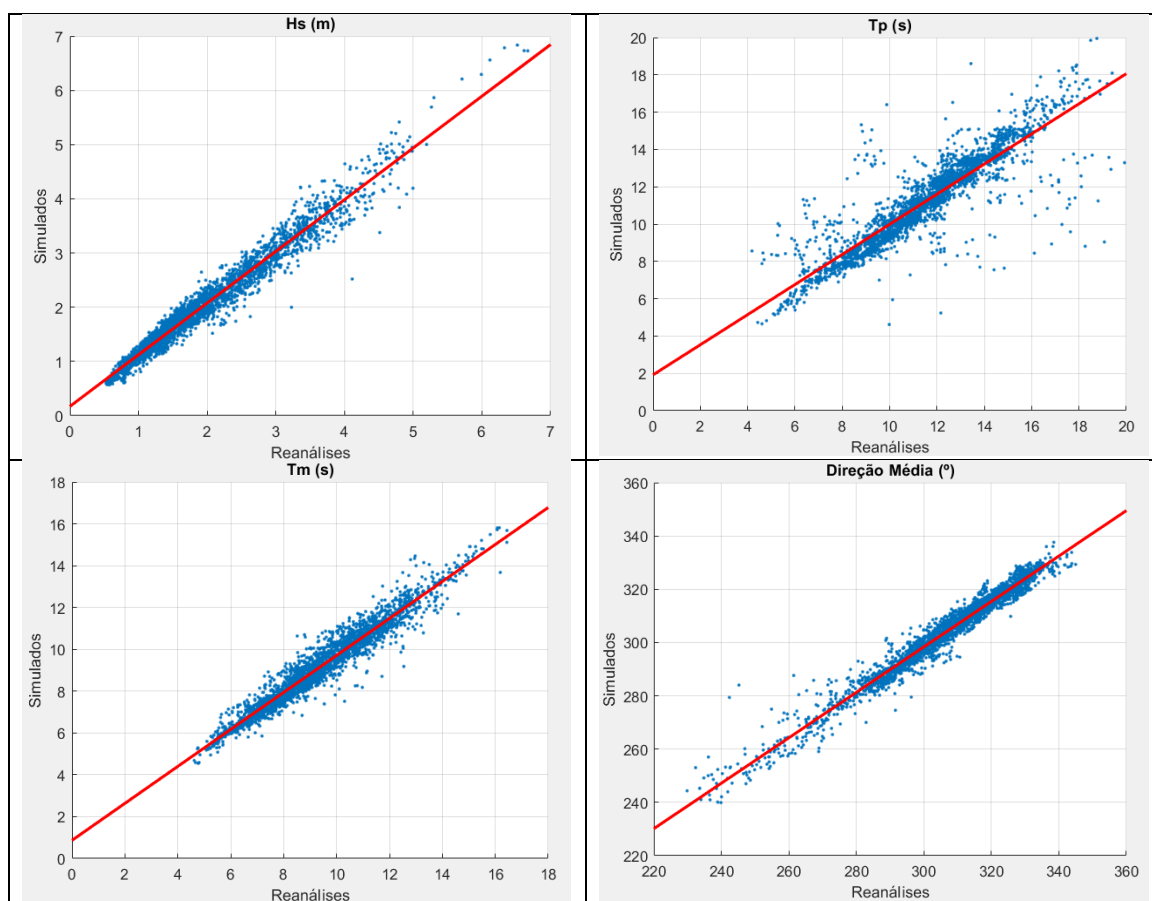


Figura 23. Scatter Plots de Hs, Tp, Tm e Direção Média entre os resultados simulados na grade Loc nas coordenadas (40°N e -9°W) e os dados de reanálises nas mesmas coordenadas.

A Figura 24 mostra os resultados de Hs simulados pelo modelo na grade Reg, dos dados de reanálises e da bóia Alfredo Ramalho para o ano de 2018.

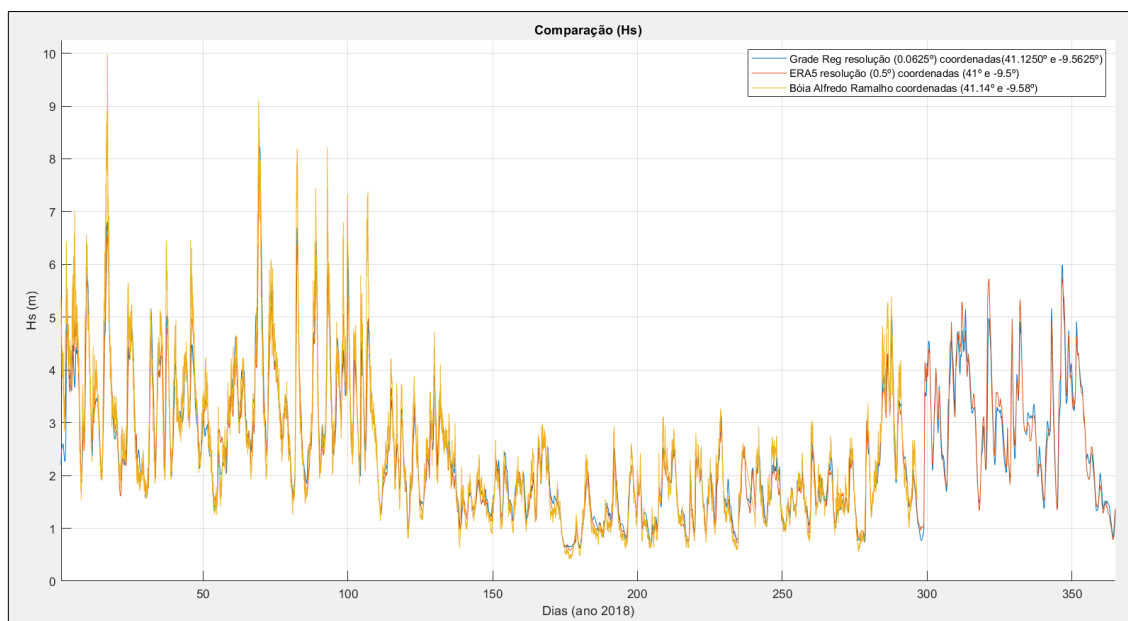


Figura 24. Comparação de Hs da simulação na grade Reg com dados de reanálises e com a bóia Alfredo Ramalho.

Pelo gráfico nota-se que os resultados simulados pelo modelo seguem a tendência dos dados aferidos pela bóia e dos dados de reanálises. Os primeiros dias os dados simulados não coincidem com os dados da bóia e de reanálises porque o modelo estava no período de aquecimento. A partir do dia 24 de outubro de 2018 até final de janeiro de 2019 houve problemas técnicos com a bóia, por isso a ausência de dados da bóia no final do ano de 2018.

Percebe-se que a tendência geral do modelo é subestimar os dados de Hs com relação aos dados aferidos pela bóia. Isto também é evidenciado pelo valor negativo do BIAS (-0.0543). Os resultados simulados tiveram uma boa correlação com os dados da bóia (0.9687), um RMSE de 0.3509 e um índice de dispersão (SI) de 0.1270. Com relação aos dados de reanálises, o modelo por vezes subestimou, outras vezes superestimou os valores de Hs.

Sobre toda área investigada por Chu et al., (2004), no Mar Sul da China, o WW3 teve um BIAS muito baixo ao prever a altura significativa de onda.

No trabalho de Cagnin et al. (2019) os autores constataram que tanto os dados de reanálises (ERA5) como seus resultados simulados com o WW3, os valores de Hs são bastante parecidos com os dados da bóia no caso de pequenas ondas e subestimados, no caso das maiores ondas.

Amrutha et al. (2016), em sua comparação da série de temporal de Hs do modelo WW3 com os dados medidos, sugeriu que eles fornecem resultados comparáveis, exceto durante as maiores ondas.

Segundo Mentaschi et al. (2015), o desempenho do modelo depende das condições do mar, a tendência geral do modelo é superestimar a altura significativa de onda em condições calmas e moderadas e subestimar em condições fortes de agitação. Os autores enunciam que valor do BIAS foi bastante pequeno dentro de uma faixa ampla de alturas de onda, mas tendeu a ser fortemente negativo sobre condições de forte agitação e fortemente positivo para alturas significativas de onda menores de 1 m.

Analisando o *scatter plot* de Hs dos resultados simulados com os dados da boia, nota-se que justamente nas maiores alturas de onda é que os dados ficam mais dispersos em relação a linha de tendência, evidenciando a afirmação dos autores supracitados.

A Figura 25 compara os resultados de Hs simulados pelo modelo na grade Loc com os dados de reanálises para o ano de 2018.

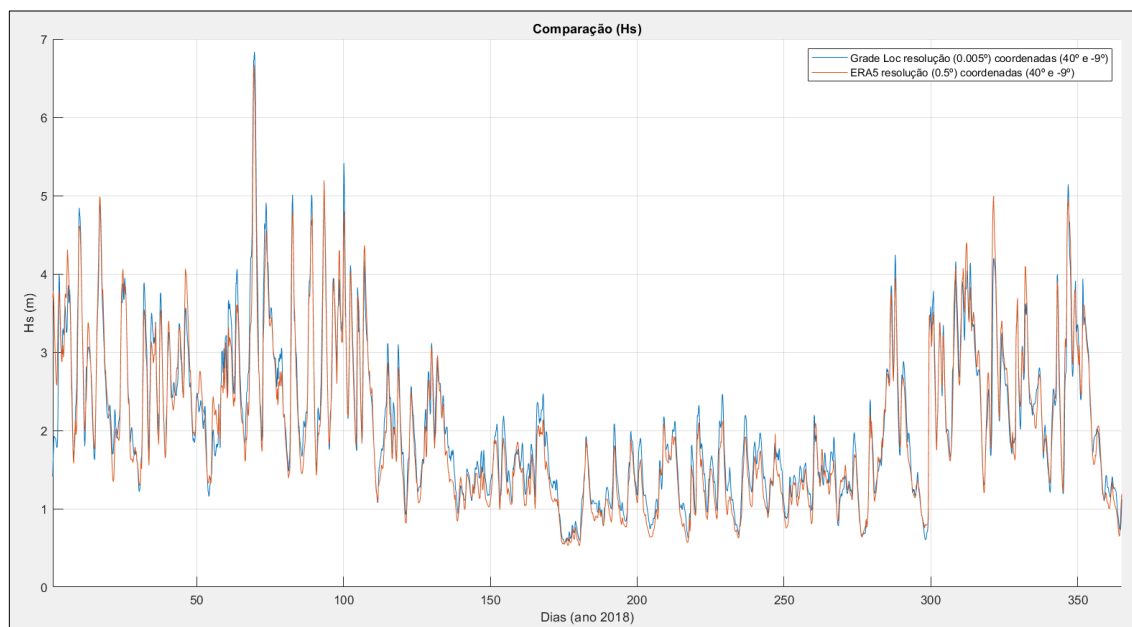


Figura 25. Comparação de Hs da simulação na grade Loc com os dados de reanálises.

A Figura 25 segue a mesma tendência da Figura 24, porém, mostra que os resultados do modelo na grade Loc tem uma ligeira tendência de superestimar os valores de Hs com relação aos dados de reanálises. Isto também pode ser evidenciado pelo valor de 0.0778 do BIAS. Os resultados simulados tiveram uma ótima correlação (0.9807), um RMSE de 0.2073 e um SI baixo (0.0865). Analisando o *scatter plot* de Hs, nota-se que para as maiores alturas de onda, os dados também ficam mais dispersos em relação a linha de tendência.

Nota-se claramente pela Figura 24 e pela Figura 25 a variação de Hs ao longo de ano, sendo que as maiores ondas estão associadas ao período de inverno e as menores ao período de verão.

A Figura 26 compara os resultados do período de pico (T_p) simulados pelo modelo na grade Reg, com os dados de reanálises e com a boia Alfredo Ramalho.

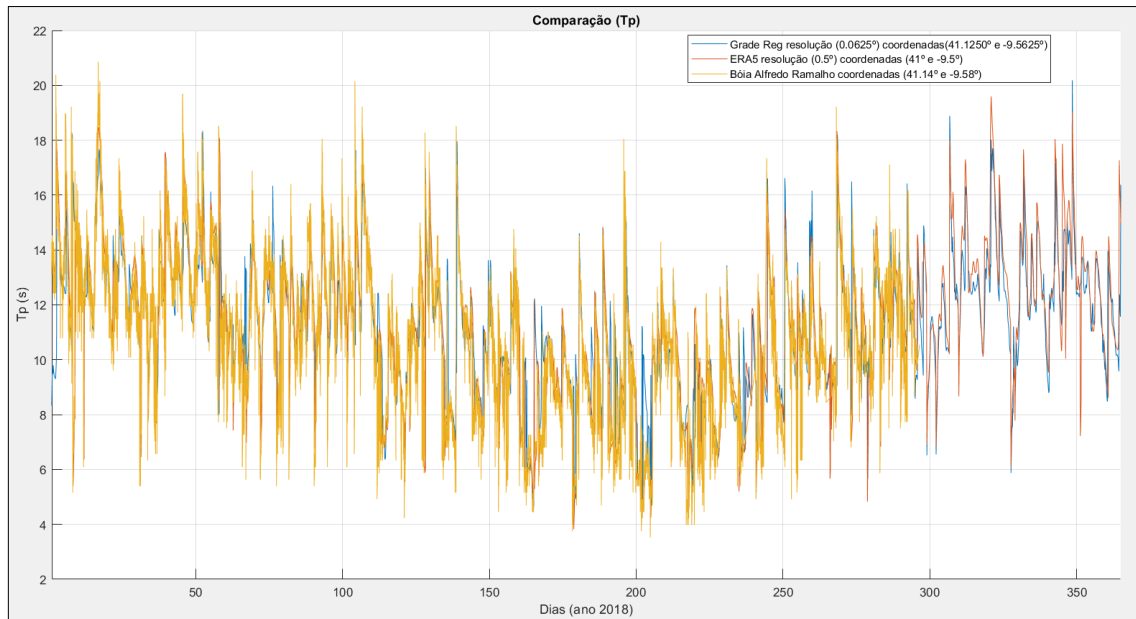


Figura 26. Comparação de Tp da simulação na grade Reg com dados de reanálises e com a bóia Alfredo Ramalho.

Observando a Figura 26 percebe-se que de um modo geral os resultados do modelo seguem a tendência dos dados aferidos pela bóia e também dos dados de reanálises. Apesar do valor do BIAS ser 0.2772, percebe-se pela Figura 26 que a maior parte dos resultados do modelo subestimam os valores aferidos pela bóia, com exceção de alguns picos que superestimam os valores. O coeficiente de correlação foi de 0.8006, o índice de dispersão de 0.1562 e analisando a *scatter plot*, percebe-se que muitos dados estão relativamente distantes da linha de tendência. Com relação aos dados de reanálises, os resultados do modelo ora subestimam e ora superestimam os valores os dados de reanálises.

Nota-se que os maiores períodos de pico encontram-se nos meses de inverno, sendo que maior parte dos valores para esta época concentram-se entre 10 a 18 segundos, com alguns picos alcançando mais de 20 segundos. Já nos meses de verão os valores concentram-se entre a faixa de 4 a 12 segundos, com alguns picos atingindo maiores valores.

Para o período de pico, Cagnin et al. (2019), constataram que os dados de reanálises (ERA5) e seus resultados do WW3 obtidos estão próximos e muito semelhantes aos dados da bóia, por vezes um pouco acima. Melo et al. (2008), constatou que o modelo tendeu a superestimar os dados observados na bóia tanto de Hs quanto de Tp.

Para Amrutha et al. (2016), durante o período sem monções, o modelo numérico falhou em produzir o *wind-sea*, resultando em uma baixa correlação entre o Tp medido e o simulado. O autor salienta que os dados de vento em grande escala usados em seu estudo podem não representar o efeito da brisa marinha, resultando em desvios ampliados no período de onda durante as estações anterior e posterior às monções. Durante a estação de monção (período dominado por *swells*), o índice de dispersão dos parâmetros de onda estimados foram mínimos e a correlação alta, comparada com os períodos sem monção (Amrutha et al., 2016).

A Figura 27 compara os resultados de Tp simulados pelo modelo na grade Loc com os dados de reanálises.

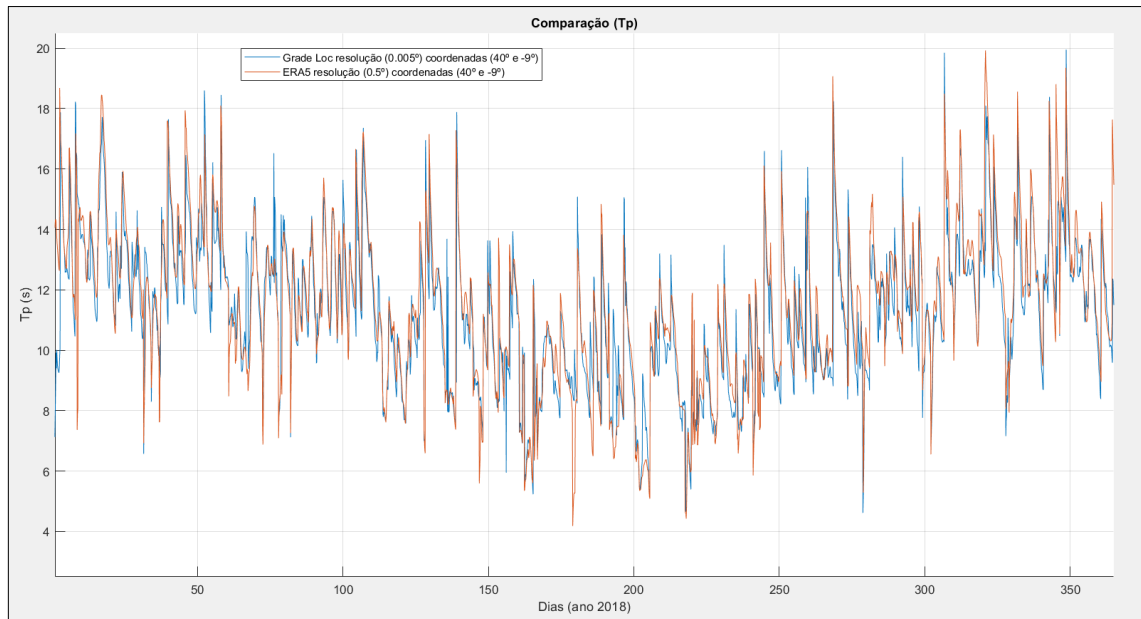


Figura 27. Comparação de Tp da simulação na grade Loc com os dados de reanálises.

A Figura 27 segue a mesma tendência da Figura 26, mostra que os resultados do modelo na grade Loc segue a tendência geral dos dados de reanálises, às vezes subestima e outras vezes superestima os valores de Tp. O BIAS foi de -0.2955 e o coeficiente de correlação de 0.8884. O índice de dispersão foi baixo (0.0995), mas analisando o *scatter plot*, pode-se notar que muitos dados estão distantes em relação a linha de tendência.

Observando as figuras de Hs e Tp percebe-se que as maiores alturas significativas estão associadas aos maiores períodos de pico, que concentram-se nos meses de inverno. Isto sustenta a hipótese da instabilidade numérica ocorrida nas simulações em janeiro, pois, as maiores ondas associadas aos maiores períodos, sentem mais o atrito com fundo, conseqüentemente, com os intervalos de tempo utilizados, em especial o intervalo de tempo da refração, provavelmente foi o que ocasionou a instabilidade numérica.

A Figura 28 mostra os resultados do período médio de onda (Tm) dos resultados simulados pelo modelo na grade Reg, dos dados de reanálises e da bóia Alfredo Ramalho.

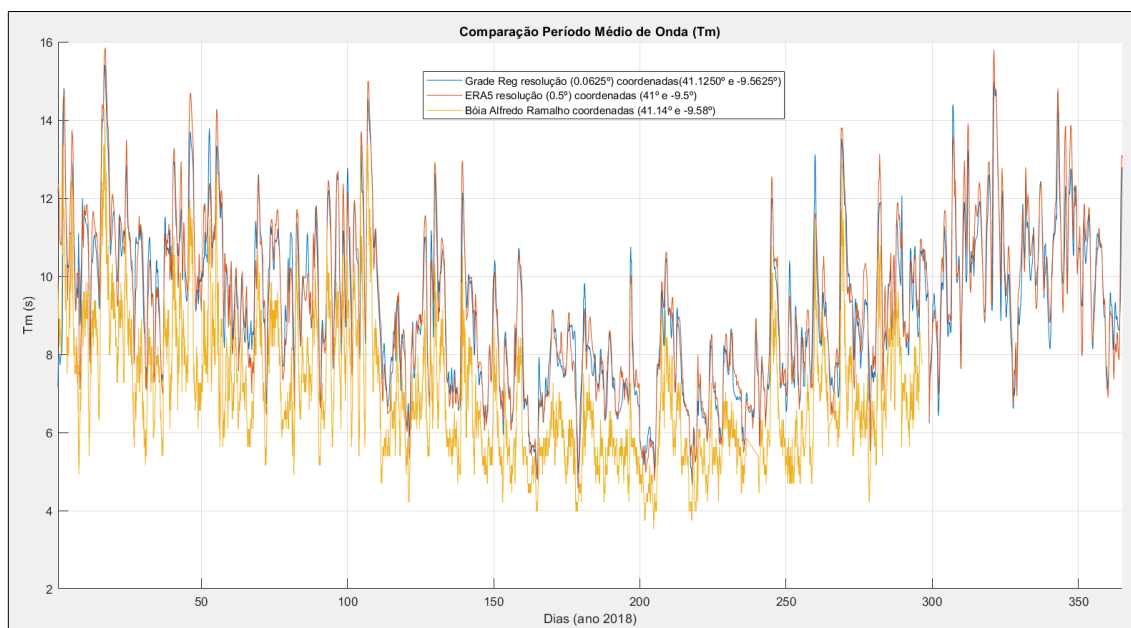


Figura 28. Comparação do período médio de onda (T_m) na grade Reg, com dados de reanálises e com a bóia Alfredo Ramalho.

Nota-se pela Figura 28 que tanto os resultados do modelo quanto os dados de reanálises superestimam os valores de (T_m) mensurados na boia. Isso também é evidenciado pelo alto valor do BIAS (1.9910), apesar do coeficiente de correlação ser 0.9103, o SI 0.1121 e os dados em relação a linha de tendência no *scatter plot* não estarem muito dispersos. Enquanto do (T_p) teve 1.7495 de RMSE, o (T_m) teve 2.1433.

Nos meses de inverno enquanto a maior parte dos valores do período médio mensurados na boia concentram-se entre 6 a 12 segundos, nos resultados do modelo e nos dados de reanálises, a maior parte dos valores encontram-se entre 8 a 14 segundos. Nos meses de verão, enquanto a maior parte dos valores do período médio mensurados pela na bóia concentram-se entre 4 a 8 segundos, nos resultados do modelo e nos dados de reanálises, a maior parte dos valores encontram-se entre 6 a 10 segundos.

Nos meses de verão onde encontram-se os menores períodos, justamente são os valores que mais são superestimados pelo modelo e pelas reanálises em relação aos mensurados pela bóia.

A Figura 29 mostra os resultados do período médio de onda (T_m) dos resultados simulados pelo modelo na grade Loc com os dados de reanálises.

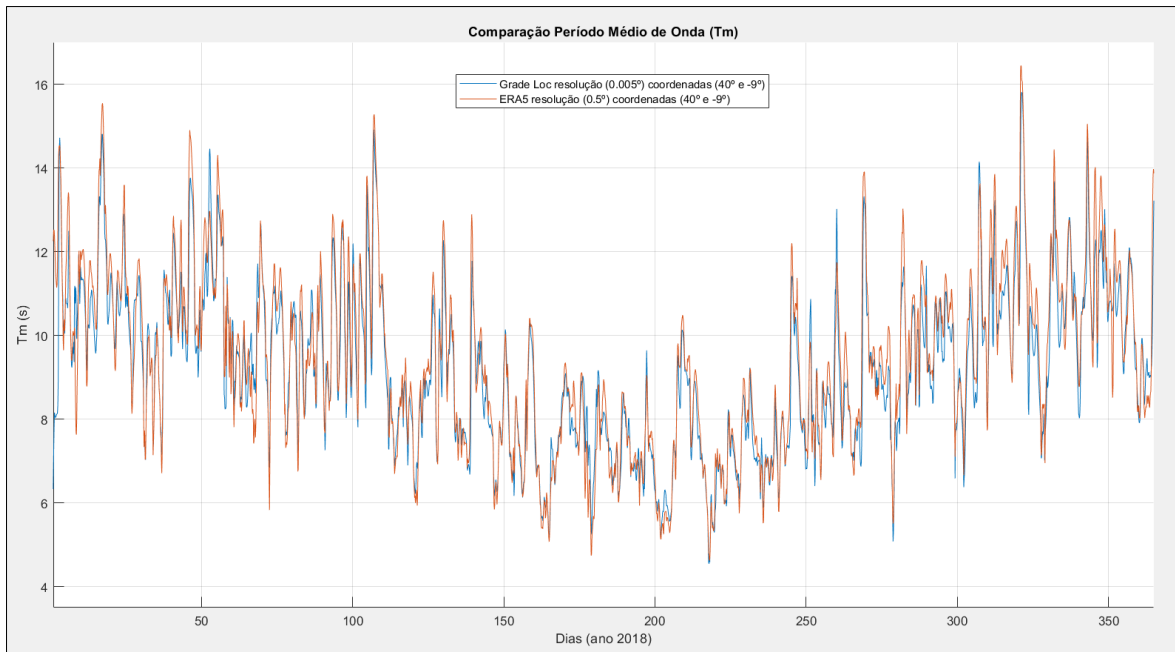


Figura 29. Comparação do período médio de onda (Tm) na grade Loc com os dados de reanálises.

Na Figura 29 nota-se que os resultados do modelo na grade Loc para (Tm) seguem a tendência dos dados de reanálises, e também estão muito próximos dos valores dos resultados da grade Reg e dos dados de reanálises da Figura 28. O valor do BIAS foi de -0.2203 o coeficiente de correlação foi de 0.9676 e SI foi de 0.0561. Analisando o *scatter plot* percebe-se que os resultados simulados não se afastaram muito da linha de tendência. Enquanto do (Tp) teve um RMSE de 1.2077, o (Tm) teve um RMSE de 0.5820.

Nos meses de inverno a maior parte dos valores do período médio concentram-se entre os 8 e 14 segundos e nos meses de verão a maior parte dos valores encontram-se entre 6 a 10 segundos.

Mentaschi et al., (2013), constataram que o BIAS para a altura de onda e período médio apresentarem tendências opostas. Analisando a Tabela 1 e a Tabela 2, isso também ocorreu, enquanto o BIAS para Hs foi positivo para o período médio foi negativo e quando o BIAS do Hs foi negativo para o período médio foi positivo. Os autores sugerem que o modelo superestima o estado inicial do mar, superestimando a geração de ondas em condições normais de agitação, e consequentemente, subestimando o período médio. Já em condições de forte agitação, a condição inicial do estado do mar parece subestimada e apresenta um BIAS positivo para o período médio.

Como foi utilizado diferentes espectros direcionais ($\Delta\theta = 15^\circ$) nas grades global e regional e ($\Delta\theta = 10^\circ$) na grade local, a Figura 30 faz a comparação da direção média de onda entre as diferentes grades. Nota-se que a diferença na direção média de onda nas diferentes grades é menor do que 5° .

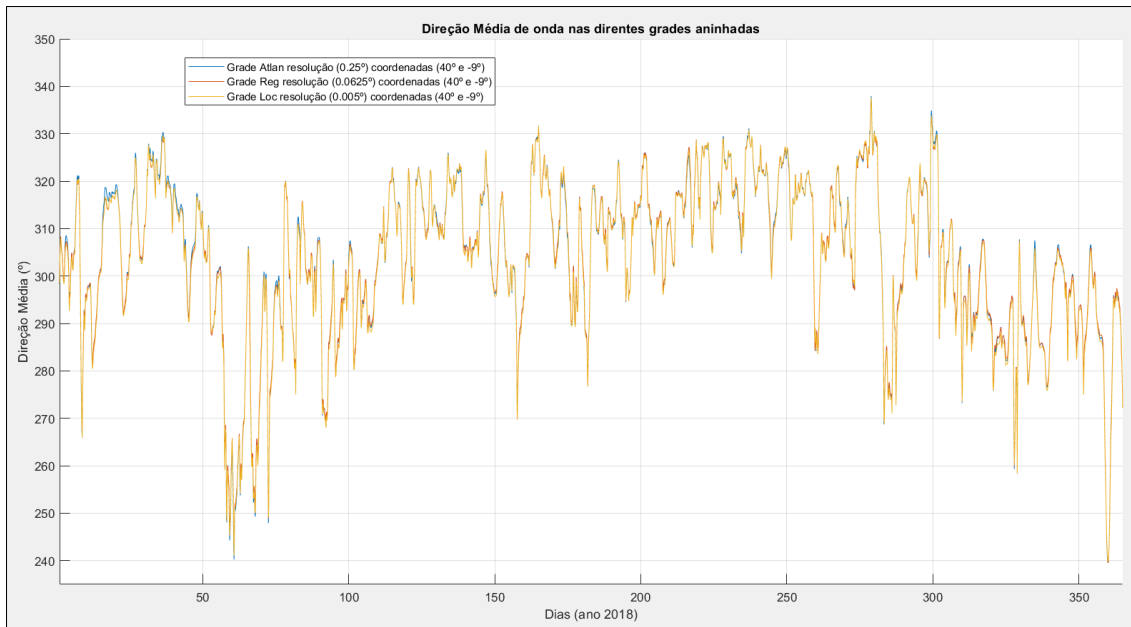


Figura 30. Comparação da direção média de onda nas diferentes grades.

A Figura 31 compara a direção média de onda na grade Reg com a boia Alfredo Ramalho e com os dados de reanálises. Percebe-se que tanto os dados de reanálises como os resultados do modelo seguem a tendência da direção média de onda registradas na boia. Os registros da direção média na boia menores do que 180° provavelmente são erros de aferição da boia.

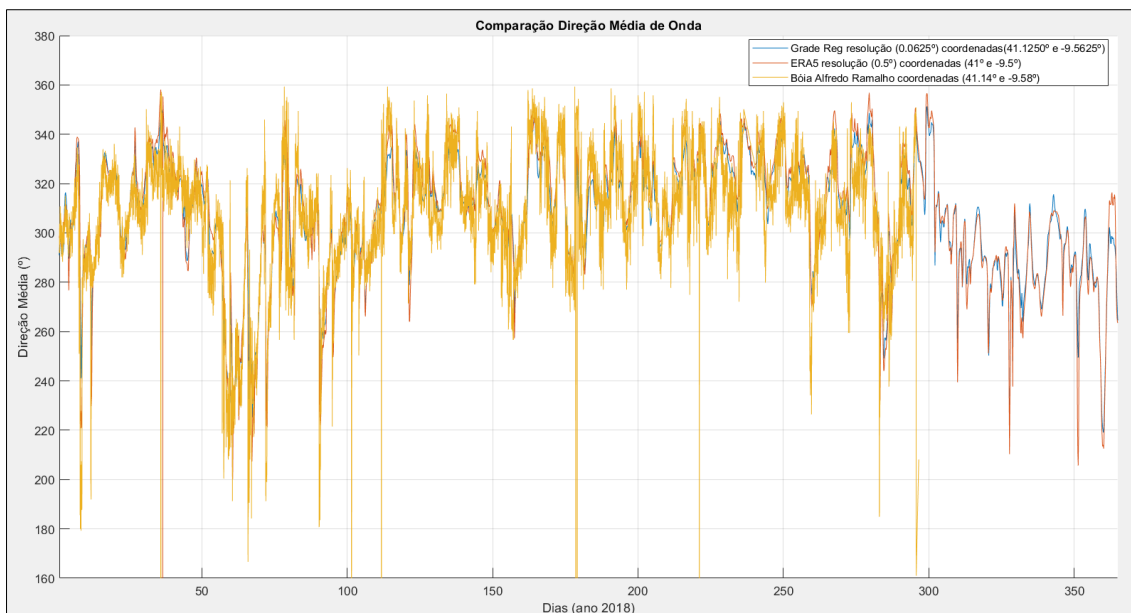


Figura 31. Comparação da direção média de onda na grade Reg, com a bóia Alfredo Ramalho e com os dados de reanálises.

Os resultados dos indicadores estatísticos para a direção média de onda para os resultados simulados em relação a boia foram: 16.6905 de RMSE, 2.1101 de BIAS, 0.7948 de coeficiente de correlação e o índice de dispersão (SI) foi bem baixo 0.0536. Analisando o *scatter plot* percebe-se

que a maior concentração dos dados encontram-se entre 270° a 350°, mas também há uma quantidade bem significativa de valores entre 180° a 270°.

No trabalho de Cagnin et al. (2019), os dados de direção média resultantes do modelo e das reanálises também ficaram muito próximos dos dados aferidos pela boia.

Segundo Melo et al. (2008), os resultados dos parâmetros de direção média e Hs mostraram-se promissores em seu estudo, indicando que o modelo conseguiu capturar a característica do clima de ondas em sua área de estudo.

Para Amrutha et al. (2016), a direção de onda foi bem simulada pelo modelo durante o período da monção, o autor enuncia que isto se deve principalmente a uma previsão precisa dos ventos.

Os resultados dos indicadores estatísticos da direção média de onda para os resultados simulados na grade Loc em relação as reanálises foram: 4.9787 de RMSE, 0.9811 de coeficiente de correlação e o índice de dispersão (SI) foi bem baixo 0.0138. Analisando o *scatter plot* percebe-se que a maior concentração dos dados encontram-se entre 280° a 345°, mas uma quantidade bem significativa de valores entre 230° a 280° também foi identificada.

A Figura 32 mostra a comparação da direção média de onda na grade Loc com os dados de reanálises.

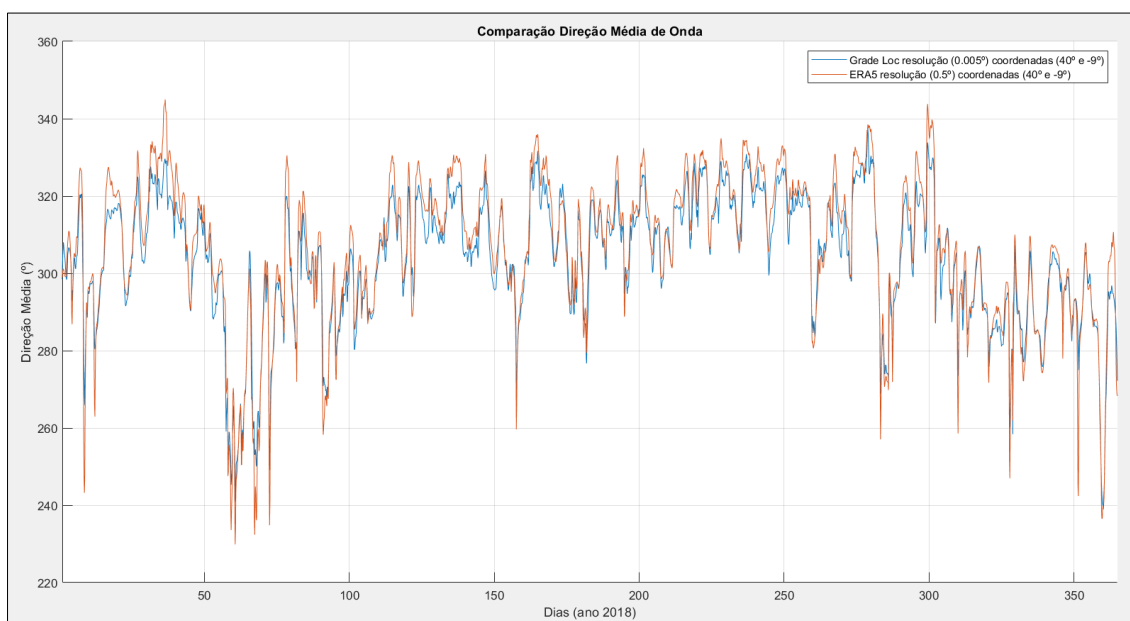


Figura 32. Comparação da direção média de onda na grade Loc com os dados de reanálises.

Percebe-se pela Figura 32 que os dados de reanálises tendem a superestimar a os valores da direção média de onda com relação aos resultados do modelo na da grade Loc, o BIAS de -2.6123 também sustenta esta afirmação. Isto pode ter ocorrido pela diferença da resolução batimétrica entre o modelo e os dados de reanálises, influenciando os efeitos da refração e conseqüentemente, a direção média entre eles.

Pelos *scatter plots* e gráficos da Figura 31 e da Figura 32, percebe-se que no ano de 2018 nesta porção da costa portuguesa a propagação da direção média de onda se concentrou em sua

maior parte entre 280°(WNW) a 360°(N). Algumas vezes por ano, especialmente na época de inverno, a direção média de onda se propagou entre 180°(S) a 260°(WSW), já no período de verão raramente isto aconteceu.

5. Considerações Finais

As comparações dos parâmetros de onda entre as diferentes grades e em relação a mesma grade com diferentes resoluções não apresentaram diferenças muito significativas.

De uma forma geral, os parâmetros de onda (Hs, Tp e direção média) simulados pelo modelo, seguem a tendência dos parâmetros mensurados pela boia Alfredo Ramalho e também dos dados de reanálises. Já o parâmetro (Tm), apesar de seguir a tendência dos dados de reanálises, não foi muito promissor quando comparado aos dados da boia.

De acordo com Amrutha et al. (2016), o campo de vento e a batimetria são componentes sensíveis do modelo. Segundo Chu et al. (2004), os erros no modelo são causados pela incerteza nos forçamentos externos (tal como ventos) ou na estrutura interna do modelo (como a resolução e física imperfeitas). Para Mentaschi et al. (2013), a componente de dispersão do erro é primeiramente devido aos dados de vento e dos defeitos do (*DIA*) na representação das interações não-lineares onda-onda.

A tendência geral do modelo foi subestimar os valores de Hs com relação aos dados aferidos pela boia, como também já salientado por diversos autores (Amrutha et al., 2016; Cagnin et al., 2019; Chu et al., 2004; Mentaschi et al., 2015). Com relação aos dados de reanálises na grade Reg, o modelo às vezes subestima e outras vezes superestima os valores de Hs. Já para os resultados do modelo na grade Loc, teve uma ligeira tendência de superestimar os valores de Hs com relação aos dados de reanálises.

Para o parâmetro (Tp) a maior parte dos resultados do modelo subestimam os valores aferidos pela boia, porém, alguns picos superestimaram os valores da boia. Com relação aos dados de reanálises, os resultados do modelo ora subestimam e ora superestimam os dados das reanálises.

Para a direção média tanto os dados de reanálises como os resultados do modelo seguem a tendência da boia. Porém, os dados de reanálises tendem a superestimar os valores em relação aos resultados simulados pelo modelo.

No parâmetro (Tm) os resultados do modelo apresentaram-se muito próximos aos dados de reanálises, porém, ambos superestimam os valores de (Tm) da bóia.

Para assegurar a estabilidade numérica do modelo, o filtro utilizado na Eq. (29) suaviza a inclinação do fundo para alguns componentes de onda de baixa frequências, onde suprime a refração em casos de mudança repentina da topografia fundo. A baixa resolução da batimetria utilizada pode ser uma das causas pelo qual o filtro da Eq. (29) não se mostrou eficiente. Outra hipótese, é que o filtro da equação não suporta ondas com períodos muito altos, conforme ocorrido em janeiro de 2018.

Portanto, como sugerido pelo manual do usuário (WW3DG, 2019), foi testado intervalos de tempo intra-espectral bem pequenos, onde assim, permitiu maiores efeitos de refração dentro das

restrições da estabilidade do esquema, já que são calculados antes de o filtro da Eq. (29) ser aplicado, e desta forma, se atingiu a estabilidade numérica.

Mentaschi et al. (2015), afirmam que a relativa imprecisão que obtiveram com o modelo em um dos seus locais de análise, pode ser devido a resolução utilizada (aproximadamente 10km), que não foi capaz de representar o perfil de declividade da plataforma continental em muitos lugares próximos a costa, não conseguindo representar adequadamente os efeitos batimétricos como a refração e empolamento. Os autores referem que isso resultou em um forte negativo BIAS na altura significativa de onda e um BIAS fortemente positivo na direção média, sugerindo uma subestimação geral dos efeitos de refração. Os autores sugerem que uma forma de resolver esse problema é pelo uso do esquema de propagação de elementos finitos, que permite a definição de grades não estruturadas no domínio computacional, refinando a resolução onde o modelo numérico necessita.

Segundo Mentaschi et al. (2020), as malhas não estruturadas permitem o aumento da resolução em áreas de interesse para aplicações específicas, potencialmente garantindo resultados precisos com respeito a domínios regulares, para os mesmos custos computacionais. A malha não estruturada empregada em seu estudo, teve custos computacionais e capacidade de modelo comparáveis aos da malha regular, mas com uma resolução mais alta perto da costa, representando assim, a dinâmica próxima à costa com maior detalhe.

Desta maneira, a fim de melhorar a economia do modelo, seria conveniente testar malhas não estruturadas, para avaliar se com maior detalhe na zona costeira (em especial das feições batimétricas), seria possível aumentar o intervalo de tempo intra-espectral, como também, avaliar como se comportaria o filtro da Eq. (29). Outra sugestão, seria inserir uma batimetria de alta resolução, para avaliar se com uma batimetria mais detalhada o intervalo de tempo intra-espectral poderia ser aumentado, como também, o comportamento do filtro da Eq. (29). A obstrução gerada na Grade Loc no aninhamento com a Grade Reg, ocasionado pela diferença entre as resoluções das mesmas, possivelmente também não ocorreria utilizando malhas não estruturadas.

6. Referências

- Amrutha, M. M., Kumar, V. S., Sandhya, K. G., Nair, T. M. B., & Rathod, J. L. (2016). Wave hindcast studies using SWAN nested in WAVEWATCH III - Comparison with measured nearshore buoy data off Karwar, eastern Arabian Sea. *Ocean Engineering*, *119*, 114–124.
- Bertotti, L., & Cavaleri, L. (2009). Large and small scale wave forecast in the Mediterranean Sea. *Natural Hazards and Earth System Science*, *9*(3), 779–788.
- Cagnin, E., Oliveira, T., & Silva, P. (2019). *Simulation of hurricanes in the Atlantic ocean with WaveWatch III*. Internship Report, SeaTech, 27pp.
- Chawla, A., & Tolman, H. (2007). Automated grid generation for WAVEWATCH III. *Tech. Note 254, NOAA/NWS/NCEP/MMAB*, 71 pp.
- Chu, P. C., Qi, Y., Chen, Y., Shi, P., & Mao, Q. (2004). South China Sea Wind-Wave Characteristics. Part I: Validation of Wavewatch-III Using TOPEX/Poseidon Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *21*(11), 1718–1733.
- Guimarães, P. V., Farina, L., Toldo, E., Diaz-Hernandez, G., & Akhmatskaya, E. (2015). Numerical simulation of extreme wave runup during storm events in Tramandaí Beach, Rio Grande do Sul, Brazil. *Coastal Engineering*, *95*, 171–180.
- Hasselmann, S., & Hasselmann, K. (1985). Computations and Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer in a Gravity-Wave Spectrum. Part I: A New Method for Efficient Computations of the Exact Nonlinear Transfer Integral. *Journal of Physical Oceanography*, *15*(11), 1369–1377.
- Komen, G. J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., & Janssen, P. A. E. M. (1994). *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press.
- Leckler, F., Ardhuin, F., Peureux, C., Benetazzo, A., Bergamasco, F., & Dulov, V. (2015). Analysis and interpretation of frequency-wavenumber spectra of young wind waves. *Journal of Physical Oceanography*, *45*(10), 2484–2496.
- Melo, E., Hammes, G. R., Franco, D., & Romeu, M. A. R. (2008). Avaliação de desempenho do modelo WW3 em Santa Catarina. *VII Semengo. Seminário e Workshop Em Engenharia Oceânica*, 1–20.
- Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., & Mazzino, A. (2013). Developing and validating a forecast/hindcast system for the Mediterranean Sea. *Journal of Coastal Research*, *65*(SPEC. ISSUE 65), 1551–1556.
- Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., & Mazzino, A. (2015). Performance evaluation of Wavewatch III in the Mediterranean Sea. *Ocean Modelling*, *90*, 82–94.
- Mentaschi, L., Vousedoukas, M., Montblanc, T. F., Kakoulaki, G., Voukouvalas, E., Besio, G., & Salamon, P. (2020). Assessment of global wave models on regular and unstructured grids using the Unresolved Obstacles Source Term. *Ocean Dynamics*, *70*(11), 1475–1483.
- NWS (2009). *WAVEWATCH III® © 2009 National Weather Service (NWS), National Oceanic and Atmospheric Administration*. <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>
- WAMDIG (1988). The WAM Model—A Third Generation Ocean Wave Prediction Model. *Journal of Physical Oceanography*, *18*(12), 1775–1810.
- WW3DG (2019). *The WAVEWATCH III® Development Group (WW3DG), (2019): User manual and*

system documentation of WAVEWATCH III® version 6.07. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 465 pp. + Appendices.