



**Identificação de Período e Direção de
Ondas Monocromáticas Através do Processamento de Imagens Ópticas**
Identification of Period and Direction of
Monochromatic Waves Through the Processing of Optical Images

Henrique Rapizo¹; Victor D'Ávila²; Nelson Violante-Carvalho¹;
Uggo Pinho³ & Carlos Eduardo Parente¹

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ, Programa de Engenharia Naval e Oceânica-PENO, Laboratório de Instrumentação Oceanográfica-LIOc, Av. Athos da Silveira Ramos 149, 21945-970 Rio de Janeiro, RJ, Brasil

² Universidade Estadual do Rio de Janeiro-UERJ, Faculdade de Oceanografia-FAOC/UERJ

³ Petrobras- Segmento de Oceanografia Operacional OCEANOP PETROBRÁS

E-mails: henriquerapizo@peno.coppe.ufrj.br; victor.a.uerj@gmail.com;

n_violante@oceanica.ufrj.br; uggo.f.pinho@gmail.com; parente@oceanica.ufrj.br

Recebido em: 05/09/2013 Aprovado em: 10/11/2013

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2014_1_36_45

Resumo

Uma nova metodologia para a obtenção do período e direção de propagação de ondas de gravidade monocromáticas é apresentada baseada no processamento digital de sequências de imagens. A análise fundamenta-se nos padrões espaço-temporais apresentados pelo *brilho* no plano da imagem. Foi empregado apenas um ponto de vista da cena visualizada, ou seja, processou-se imagens de somente uma câmera. A principal motivação é apresentar uma configuração simplificada e prática que permita a implementação operacional da medição, tanto em laboratório quanto em plataformas de petróleo ou no alto de prédios. Os resultados obtidos pela técnica aqui proposta são considerados promissores e correspondem a experimentos realizados em um tanque de ondas monocromáticas. O erro máximo na determinação do período de onda obtido foi de 0.06 segundos e na direção de propagação 7.80°. O processamento de imagens demonstra ser uma ferramenta valiosa para a medição dos parâmetros de período e direção de ondas.

Palavras-chave: Ondas superficiais geradas pelo vento; técnicas ópticas de medição; medição de parâmetros de onda remotamente

Abstract

A new methodology to estimate the period and direction of monochromatic surface gravity waves is presented based on the processing of a sequence of images. The analysis focuses on the spatial-temporal variability of *brightness* on the image plane. One camera only is employed to record the water surface. The main motive is to come up with a simplified and practical configuration which allows its operational implementation either on the laboratory or on oil platforms or on top of buildings. The promising results correspond to experiments in a monochromatic wave tank. The image processing technique has proven to be a valuable tool for wave measurements.

Keywords: Surface wind generated waves; optical measurement techniques; remote measurement of wave parameters

1 Introdução

O estudo das ondas se fundamenta em uma etapa crucial: a observação. Neste sentido, torna-se primordial obter formas eficazes de registro de dados, que possibilitem a análise e o monitoramento dos principais parâmetros que caracterizam o estado de mar. Tradicionalmente, os equipamentos mais utilizados são baseados em sensores pontuais, fixos ou semi-fixos, da elevação da superfície do oceano, como boias do tipo *heave, pitch-roll*. Estes sensores são acurados o suficiente para obter séries temporais de elevação, mas apresentam restrições quanto à descrição espacial e direcional do campo de ondas analisados (Wanek & Wu, 2006).

Neste cenário, o uso de técnicas ópticas para o imageamento da superfície do mar mostra-se extremamente interessante, apresentando-se como uma medição de baixo custo, não intrusiva e com grande abrangência espacial e temporal de informações a respeito do campo de ondas. As medições pontuais tradicionais fornecem séries temporais de determinado parâmetro. Uma única fotografia contém grande quantidade de informações espaciais do campo de ondas e, estendendo o processamento para uma sequência sucessiva de imagens, tem-se uma enorme disponibilidade de informações espaciais e temporais em alta resolução da cena visualizada (Jähne, 1993).

O uso de imagens para medição de ondas é feito há mais de um século (Kohlschütter, 1906). Os primeiros trabalhos apresentados basearam-se em configurações estereoscópicas, a fim de reconstruir a superfície do oceano (e.g. Kohlschütter, 1906; Laas, 1905, 1921; Schumacher, 1939; Cote *et al.*, 1954), sendo ainda hoje a técnica mais explorada para estes fins. Posteriormente, alguns trabalhos atentaram para a medição de ondas utilizando apenas uma câmera, como técnicas baseadas na reflexão da luz, pioneiramente apresentadas por Cox & Munk (1954a, 1954b) e posteriormente por Stilwell (1969).

Nas últimas três décadas, diversos trabalhos foram realizados baseados em técnicas estereoscópicas para a análise e medição de ondas. (e.g. Holthuijsen, 1983a, 1983b; Shendim *et al.*, 1988; Banner *et al.*, 1989; Santel *et al.*, 2004; Benetazzo, 2006; Benetazzo *et al.*, 2012; Wanek & Wu, 2006; Mironov *et al.*, 2012). Os problemas clássicos de identificação dos pontos homólogos na estereoscopia (problema de correspondência) são potencializados no oceano, onde se tem uma superfície dinâmica e repetitiva, muitas vezes apresentando um caráter caótico. As fontes de

erros são variadas e a configuração do sistema estereoscópico para a otimização dos resultados dificultam sua utilização de forma operacional. Devido à sua complexidade, se torna precipitada a aplicação direta dos conceitos estereoscópicos sem antes sacar informações qualitativas da cena e do campo de ondas observado, que podem ser obtidas através de configurações mais simples, por exemplo empregando uma única câmera.

Este estudo tem como principal proposta o desenvolvimento de uma metodologia simples e eficaz para a determinação dos parâmetros de período e direção de propagação de ondas, sendo de fácil implementação operacional e de baixo custo. Para isso, relacionam-se os padrões espaço-temporais de comportamento do brilho ao longo de uma sequência de imagens com as características das ondas observadas. As medições foram realizadas em um tanque de ondas monocromáticas, onde o período e a altura gerados são comparadas com as obtidas pela técnica aqui discutida.

Diversos estudos e pesquisas vêm sendo realizados em diferentes países ao longo de vários anos abordando a medição e análise de ondas a partir do processamento digital de imagens. No Brasil, porém, esta ainda é uma área da pesquisa incipiente. A principal motivação deste trabalho, mais do que apresentar uma solução definitiva para o problema, é inserir uma nova linha de pesquisa voltada ao processamento de imagens convencionais para fins oceanográficos e incentivar o seu desenvolvimento, demonstrando o potencial de utilização. A implementação de uma alternativa simples, barata e eficaz pra medição de ondas seria também extremamente interessante tendo em vista a escassez de dados de onda no Brasil, e principalmente sua disponibilidade para instituições de pesquisa.

2 Metodologia

2.1 Período de Onda

O *brilho* na imagem é função da orientação da superfície, ou seja, de sua inclinação (Stilwell, 1969). A partir das eqs. (1) e (2) observa-se que as componentes x e y da inclinação, η_x e η_y , possuem o mesmo período de oscilação da elevação:

$$\eta(x, y, t) = \text{acos}(k_x \cos\theta + k_y \sin\theta - \omega t + \varepsilon) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = \eta_x = -\text{akcos}\theta \text{sen}(k_x \cos\theta + k_y \sin\theta - \omega t + \varepsilon) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial y} = \eta_y = -\text{aksen}\theta \text{sen}(k_x \cos\theta + k_y \sin\theta - \omega t + \varepsilon)$$

onde η representa a elevação da superfície livre, k_x e k_y as componentes do número de onda k , ω é a frequência angular, ε a fase inicial e θ o ângulo de incidência da onda propagante.

Portanto a análise espectral de séries temporais de *brilho* pode fornecer os períodos das principais componentes de onda envolvidas. Esta hipótese é o conceito básico da análise aqui proposta, podendo ser expressa pela relação:

$$Tp = \frac{1}{f(\max(S(f)))} = \frac{1}{f(\max(B(f)))} \quad (3)$$

Onde $S(f)$ é o espectro de frequência da série de elevações da superfície livre da água e $B(f)$ é o espectro do *brilho*.

A título de exemplificação, a Figura 1 apresenta a comparação entre dois espectros e as respectivas séries temporais obtidas de um dos experimentos realizados no tanque de ondas, onde foi gerada uma onda monocromática com período de 1 segundo. O gráfico (a) representa a série de elevação de uma onda sintética, criada para fins ilustrativos, com exatamente 1 segundo de período e altura arbitrária. Em (b) seu respectivo espectro de frequência. A comparação com uma série temporal de *brilho* medida em um ponto fixo (c) e seu espectro (d) para uma onda de 1 segundo gerada demonstra que o período de oscilação é estritamente o mesmo.

A análise espectral espacial, por outro lado, se torna ineficiente para determinar os comprimentos de onda, na medida em que a iluminação local pode não ser homogênea na área visualizada. Ou seja, duas regiões com mesma inclinação podem possuir valores de *brilho* consideravelmente distintos. Por outro lado, no caso da análise temporal é viável considerar que as condições de iluminação dificilmente variam para um ponto específico durante o período de duração do vídeo, de poucos minutos.

Os espectros de *brilho* possuem, em geral, picos relacionados à reflexos pontuais de luz, como pode se ver na Figura 1d. Estes picos possuem frequências de oscilação múltiplas da frequência da onda. Porém, alguns pontos na imagem podem não apresentar estes reflexos ou os apresentam em outras frequências múltiplas da fundamental. O período de oscilação de onda, por sua vez, estará presente em todos os espectros correspondentes aos pixels da imagem. Para minimizar este problema, foram empregados diversos pontos de uma mesma imagem, tornando a estatística mais robusta. Calcula-se portanto os espectros de diversos pontos em uma mesma imagem e estes são multiplicados entre si, o que elimina ou mitiga a amplitude das oscilações múltiplas da fundamental.

Além da multiplicação dos espectros obtidos de pontos de uma mesma imagem, realizou-se também a análise da coerência entre os pontos

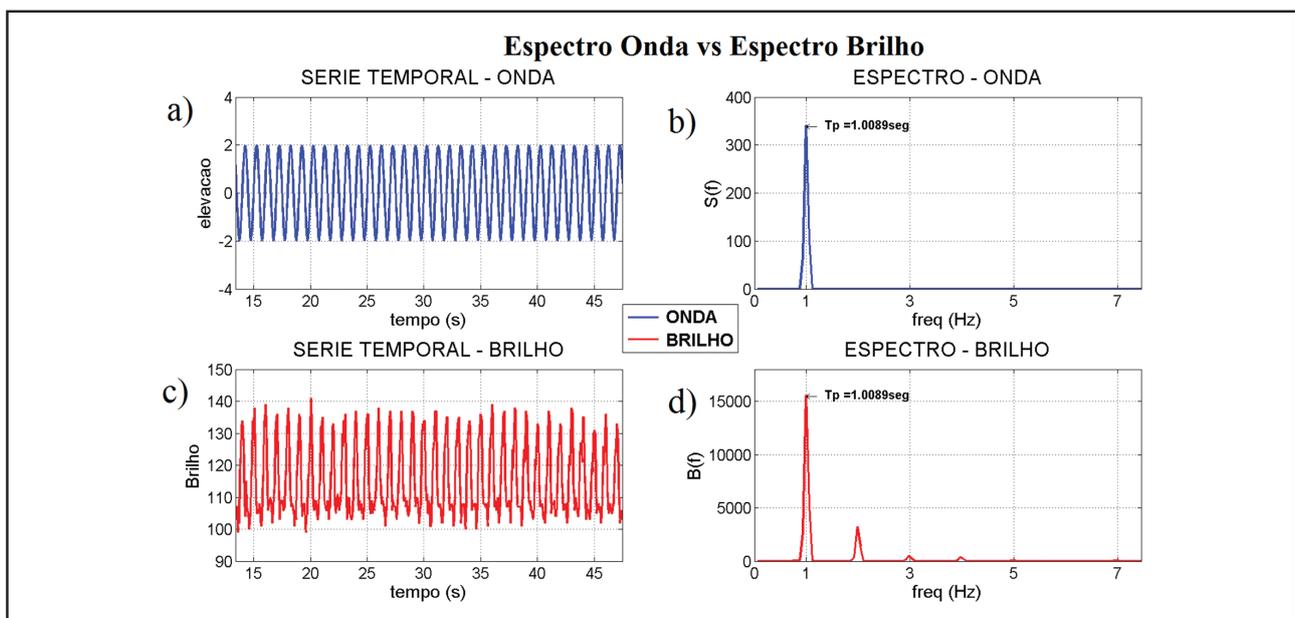


Figura 1 Comparação entre o espectro de frequência $S(f)$ de uma onda de 1 segundo de período e o espectro obtido pela série temporal de brilho $B(f)$. Os gráficos (a) e (b) representam respectivamente a série temporal de elevação da superfície e seu espectro. De forma análoga, em (c) e (d) a série de brilho e o espectro correspondente. Neste, são observados picos múltiplos da frequência fundamental, possivelmente associados com reflexos pontuais causados pela iluminação não homogênea do laboratório.

utilizados no processamento. Os picos de energia que apresentam coerência menor que 0.8 são descartados. A escolha deste valor foi feita pela observação de valores típicos de coerência entre picos espectrais que representam o período da onda. Portanto, as frequências candidatas a representar o período da onda devem apresentar um valor de coerência elevada com os demais pontos distribuídos.

2.2 Direção de Propagação – Estimativas de Movimento na Imagem

A análise de movimento é extremamente importante neste trabalho, já que se aborda um fenômeno físico altamente dinâmico. A partir do momento em que o processamento é estendido de uma imagem instantânea da superfície para uma sequência de imagens, a análise temporal passa a fornecer a possibilidade de se observar a dinâmica dos movimentos na cena.

A análise da distribuição espacial e temporal do *brilho* permite a obtenção do chamado *fluxo óptico ou fluxo da imagem*. O *brilho* pode ser representado em uma escala de valores de cinza (Bezryadin *et al.*, 2007). A técnica de fluxo óptico estima o movimento diretamente dos valores de cinza encontrados na imagem. Supõe-se que estes valores carregam informações essenciais da cena e que, conforme se movimentam no plano da imagem, são insensíveis às mudanças na iluminação (Jähne, 1993). Desta forma características consistentes do movimento real podem ser extraídas a partir do fluxo destes valores ao longo do plano da imagem.

O fluxo óptico é, portanto, o movimento aparente dos valores de cinza (*brilho*) no plano da imagem baseado na percepção visual, tendo assim unidade de velocidade. O princípio básico da técnica é relacionar características da distribuição espacial do *brilho* correspondentes em duas imagens consecutivas. Esta correlação de padrões pode ser representada por um vetor deslocamento, que está diretamente relacionado com a projeção do movimento físico real a partir do sistema óptico.

O conceito de fluxo óptico é derivado da dinâmica de fluidos, e baseia-se na Equação da Continuidade. Desta forma, cria-se uma relação de conservação de *brilho* a partir dos conceitos tradicionais de continuidade empregados na dinâmica de fluidos. A equação da continuidade de fluidos é expressa em sua forma diferencial por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + U^T \cdot \nabla \rho + \rho \nabla \cdot U = 0 \quad (4)$$

onde U é a velocidade. Em um primeiro momento poderíamos apenas substituir o termo de densidade, ρ , pelo valor de *brilho* ou escala de cinza correspondente, g . Desta forma obtém-se:

$$\frac{\partial g}{\partial t} + U^T \cdot \nabla g + g \nabla \cdot U = 0 \quad (5)$$

Porém, deve-se, examinar cuidadosamente os termos da eq. (5) para saber se a correspondência no plano da imagem seria apropriada. Pode-se dizer que o termo, $U^T \cdot \nabla g$, descreveria a variação temporal do *brilho* pela advecção dos valores de cinza na imagem. O termo, $g \nabla \cdot U$, representa o divergente da velocidade e, aplicado a uma imagem, ele causaria uma mudança de *brilho* mesmo em regiões onde este parâmetro é constante, quando o divergente for diferente de zero (Jähne, 1993). Portanto, este termo parece não ser apropriado para uma aplicação em imagens e é portanto desprezado, com a Equação de Conservação de *brilho* então representada pela seguinte expressão:

$$\frac{\partial g}{\partial t} + U^T \cdot \nabla g = 0 \quad (6)$$

Para apenas uma dimensão reduz-se a:

$$\frac{\partial g}{\partial t} + u \frac{\partial g}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

A partir da expressão acima, pode-se determinar diretamente a velocidade:

$$u = -\frac{\frac{\partial g}{\partial t}}{\frac{\partial g}{\partial x}} \quad (8)$$

A aplicação para visualização de ondas é adequada na medida em que os maiores contrastes são vistos nas regiões de crista, ou seja, o gradiente espacial tende a indicar a direção transversal à linha de crista enquanto que a derivada temporal indica o sentido de sua propagação.

Para ilustrar o resultado do Fluxo Óptico em uma imagem, aplicou-se a técnica em uma onda sintética de escalas de valores de cinza (Figura 2). A imagem da esquerda representa a onda em um instante t , enquanto a imagem da direita expressa o instante $t + dt$. A Figura de baixo é o fluxo óptico calculado a partir de (8) aplicada às duas dimensões espaciais da imagem (x,y) , apresentando o campo vetorial de velocidades.

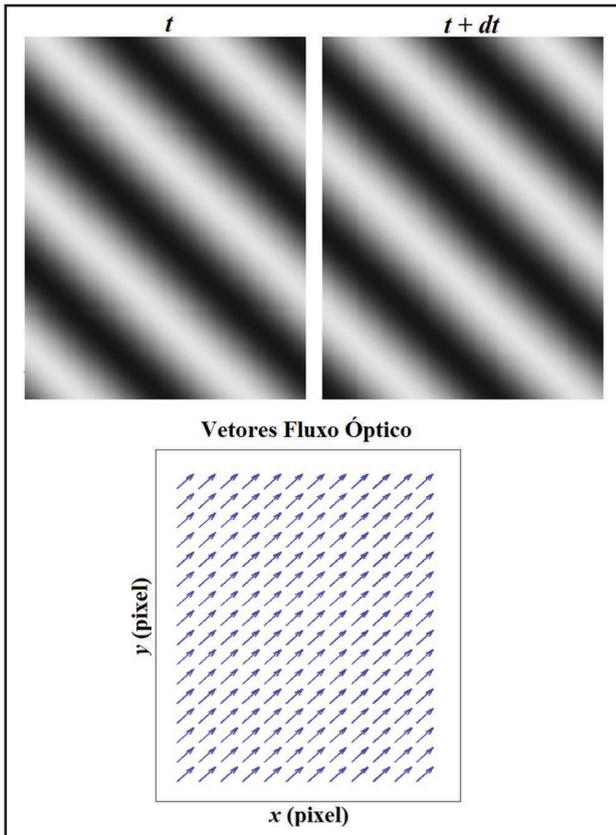


Figura 2 Duas imagens consecutivas de uma onda sintética (acima) e o Fluxo Óptico obtido pelo deslocamento da onda na imagem.

3 Experimento

O experimento foi realizado no tanque de ondas monocromáticas da COPPE – UFRJ (*Instituto Alberto Luiz Coimbra* de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro). Foram geradas ondas regulares a partir da configuração programável dos parâmetros de altura e período. A utilização de testes experimentais em um caso simplificado como este ajuda a abordar o problema em sua forma mais simples, o que é interessante nos primeiros estágios de desenvolvimento do trabalho.

Para a aquisição dos vídeos utilizou-se uma câmera digital *Olympus X-760*, com sensor digital CCD (*Charge Coupled Device*) de 1/2.5" e abertura angular de 37.3°. A taxa temporal foi configurada para adquirir 15 frames por segundo, o que é acima do mínimo necessário, já que o menor período analisado é de 0.5 segundo. As dimensões das imagens são de 320 x 240 pixels, com tamanho de pixel de 0.273 mm.

O tanque utilizado possui dimensões de 28 metros de comprimento e 1 metro de largura (Figura 3). O processo de geração da onda é realizado por um batedor, que oscila com a frequência da onda desejada e amplitude proporcional à sua altura. A onda se propaga ao longo do tanque até chegar a uma praia artificial, onde quebra, minimizando assim a reflexão e interferência ondulatória no experimento. As ondas que o tanque pode gerar possuem períodos (T) entre 0.5 e 3 segundos e altura (H) entre 2 e 20 centímetros. A direção de propagação da onda era sempre a mesma, já que o tanque gera ondas apenas em uma direção, longitudinal.

A câmera foi posicionada a 14 metros de distância do batedor e a uma altura H_c de 0.5 metros do nível de água. Utilizou-se, dois tipos de configuração para o ângulo de inclinação $\xi\xi$ entre os eixos óptico e horizontal. A primeira com ângulo de 0° e a segunda de 20.5° (Figura 3). O ângulo de declinação na instalação da câmera foi de 0°.

A instalação da câmera foi realizada de modo a visualizar as cristas das ondas exatamente de frente, ou seja, com o ângulo de azimute em relação ao raio de propagação da onda igual à zero. Porém, o processamento das imagens revelou que o ângulo de azimute não foi exatamente de 0°. Dos nove casos realizados, os três primeiros apresentaram um ângulo de $\sim 9^\circ$, enquanto nos outros seis o desvio foi de $\sim 5^\circ$.

Para a análise do período de onda, foram dispostos 145 pontos fixos na imagem, em forma de uma “rosa de pontos” com círculos concêntricos (Figura 4 à esquerda). Cada ponto fornece uma série temporal de *brilho*, que é analisada espectralmente. O período é determinado através da correlação de todos os espectros individuais obtidos. Com isso, tem-se um espectro total representativo de cada caso analisado, sendo o período espectral corresponde ao período da onda.

Para o cálculo do fluxo óptico considerou-se uma matriz de pontos equidistantes com dimensões 8 x 5, totalizando 40 pontos (Figura 4 à direita). Nestes obteve-se o vetor de velocidade óptica para

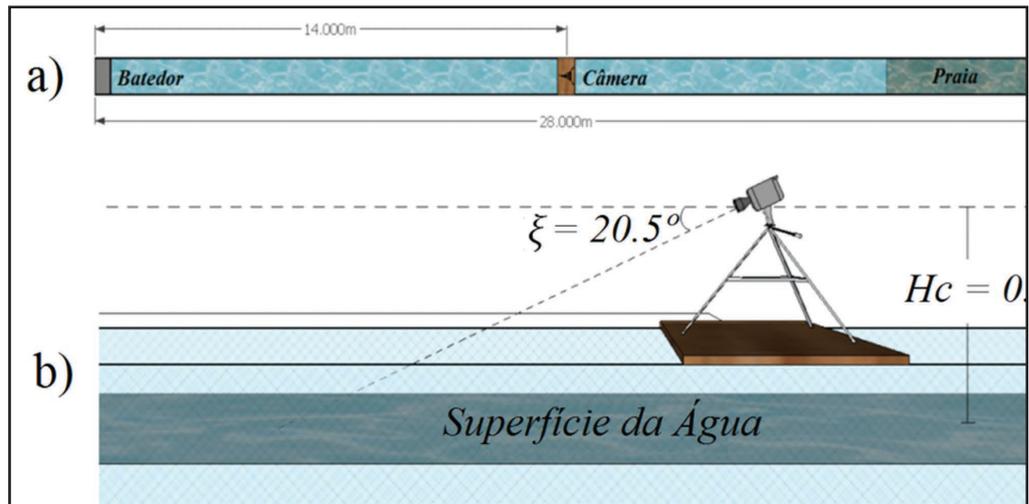


Figura 3 Tanque de Ondas Monocromáticas. a) visão em planta do tanque e suas dimensões e; b) visão lateral, mostrando os parâmetros de altura da câmera em relação à superfície ou nível médio de água (H_c) e inclinação do eixo óptico (ξ).

cada instante de tempo. A direção da onda é dada pela média vetorial entre todos os pontos ao longo da sequência.

Os vídeos foram, em média, de 70 segundos, o que, com uma taxa temporal de aquisição de 15 frames.s⁻¹, gera um total de 1050 frames por filmagem. Destes, separou-se 1024 imagens em sequência para o posterior processamento. A resolução temporal dt é de 0.067 segundos, o que é suficiente para a análise dos períodos de onda gerados pelo tanque. A análise espectral foi realizada utilizando-se a técnica de *Welch* (Welch, 1967), onde as séries temporais foram separadas em 4 segmentos de 256 pontos cada, utilizando um *overlap* de 50%.

Foram realizados, no total, nove casos, três com o ângulo de inclinação do eixo óptico igual

a zero e seis com a câmera inclinada em 20.5°. Os períodos das ondas variaram entre 0.5 e 1.5 segundos e as alturas entre 5 e 15 centímetros. A Tabela 1 apresenta um resumo geral do experimento, mostrando a relação de todas as ondas geradas, os respectivos períodos, alturas e direções de cada caso e os resultados obtidos através do processamento.

4 Resultados

4.1 Período de Onda

O período de onda (T) foi determinado de forma precisa em todos os nove casos analisados (Tabela 1). Os resultados obtidos para este parâmetro revelam um pequeno erro entre o período resultante do processamento e a onda gerada para todos os

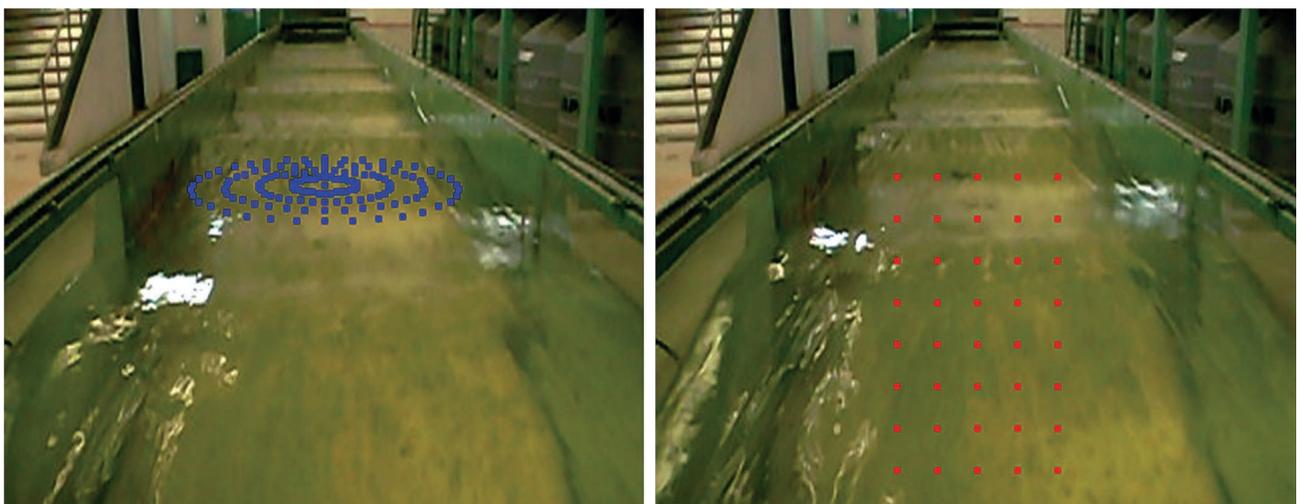


Figura 4 Imagem obtida pela câmera, durante o experimento, mostrando a posição dos pontos utilizados para o processamento. À esquerda, os utilizados para análise espectral das séries temporais e, à direita, aqueles fixados para cálculo do fluxo óptico para cada instante de tempo.

casos. Esta diferença está principalmente associada à resolução em frequência. A análise espectral foi feita com o método de Welch, com a segmentação da série em trechos de 256 pontos, o que corresponde a 17.07 segundos, e *overlap* de 50%. A resolução em frequência da análise é, portanto:

$$df = \frac{1}{T} = \frac{1}{17.07} = 0.059\text{Hz} \quad (9)$$

Apenas um dos erros encontrados na determinação dos períodos foi superior ao valor da resolução em frequência. O erro máximo foi de 0.061 segundos. A raiz quadrada do erro quadrático médio foi 0.030 segundos.

A Figura 5 apresenta os espectros de *brilho* para 6 pontos adjacentes de uma das linhas contidas na “rosa de pontos”, obtidos para o caso 7. O período da onda gerada é de 1 segundo. Cada gráfico apresenta o espectro da série temporal de *brilho* para um ponto. Observa-se uma grande variação de comportamento dos espectros de acordo com a posição do ponto que o representa.

Pode-se, observar espectros com máximos de energia em frequências múltiplas da frequência da onda (Figura 5). Estes picos podem estar associados à diferentes processos. O principal é a presença de regiões na superfície da água com reflexos pontuais de luz ou de objetos nas proximidades do tanque. Outra possibilidade é o fato de o sistema mecânico

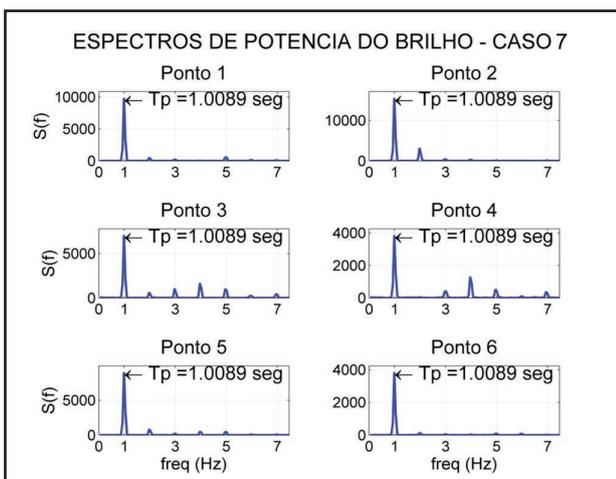


Figura 5 Espectros de brilho correspondentes a 6 pontos adjacentes contidos em um dos arrays lineares do caso 7. Período de onda gerada de 1 segundo. Alguns espectros apresentam picos de energia em frequências múltiplas à frequência da onda, possivelmente associados a regiões de reflexos pontuais de luz.

de geração poder naturalmente gerar ondas com frequências múltiplas à oscilação principal, fazendo com que possivelmente existam outras ondas se propagando no tanque, incluindo aquelas geradas por reflexões nas suas paredes.

A multiplicação dos 145 espectros obtidos elimina ou reduz significativamente a participação relativa destes picos espúrios. Por outro lado, a energia associada à frequência da onda está presente de forma significativa em todos os pontos, sendo o pico dominante em praticamente todos os espectros analisados. Desta forma, o espectro total resultante da multiplicação apresenta a predominância clara do período da onda em detrimento de outras frequências (como observado na Figura 6).

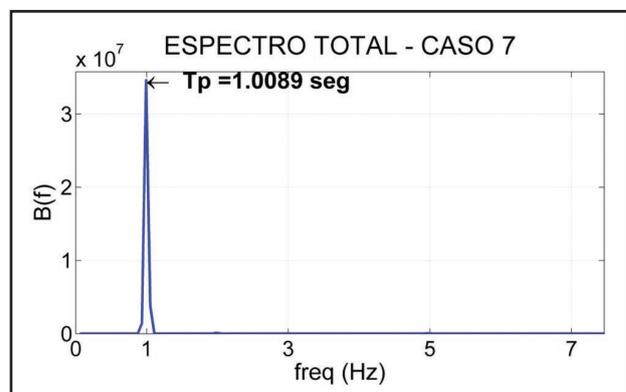


Figura 6 Espectro total resultante da multiplicação dos 145 espectros obtidos para o caso 7 - período de onda T de 1 segundo. Tp = 1.0089 segundos

4.2 Direção de Propagação

O fluxo óptico no plano da imagem possibilitou determinar a direção de propagação da onda em 7 dos 9 casos analisados. Como o vetor velocidade óptica é determinado para cada passo de tempo nos pontos pré-determinados, realizou-se a média vetorial, tanto espacial como temporalmente, a fim de facilitar a visualização. Esta estatística possibilita também eliminar ruídos da imagem e fluxos indesejados, como os causados por reflexos pontuais de luz e objetos na superfície da água.

Os resultados da direção média obtida são apresentados na Tabela 1. Usou-se para representação da direção de ondas como sendo 0° (para a direção norte-sul) e 180° (para a direção sul-norte), considerando o referencial da câmera. O eixo de visão da câmera (azimute) está orientado com ~9° de angulação em relação ao eixo longitudinal do tanque nos primeiros 3 casos e ~5° nos restantes. Desta forma, considerou-se a direção real de propagação

da onda como 347° para os três primeiros e 351° para os outros seis casos.

Os dois casos (2 e 3) em que não foi possível obter a direção real de propagação da onda estão possivelmente relacionados à inclinação da câmera. Os três primeiros casos representam aqueles onde não há inclinação do eixo óptico em relação ao eixo horizontal. Consequentemente, com a visão da câmera direcionada para frente, a perspectiva da projeção da cena no plano da imagem é mais acentuada. Isto faz com que a onda tenha um deslocamento relativo na imagem menos perceptível, já que a distância real percorrida pela onda representa um deslocamento relativo no plano da imagem cada vez menor quanto maior a perspectiva de projeção.

Para ilustrar a diferença de perspectiva causada pela inclinação da câmera, a Figura 7 compara duas imagens referentes aos casos 2 e 6, respectivamente. Ambos possuem o mesmo período (1 segundo) e altura (13 centímetros), porém o primeiro (superior esquerdo) com o eixo óptico inclinado e o segundo sem inclinação (inferior esquerdo).

Observa-se claramente que no caso em que a câmera está inclinada, os vetores de velocidade obtidos a partir do cálculo do fluxo óptico apresentam comportamento homogêneo e coerente com a passagem da onda em relação ao plano da imagem. Por outro lado, a não inclinação do eixo óptico, somada à pequena cota de altura de instalação da câmera em relação à altura da onda, faz com que os vetores não possuam orientação definida.

Para casos em que a câmera foi instalada com eixo óptico inclinado, pode-se observar uma clara predominância dos vetores de fluxo óptico em sentido à parte inferior da imagem. Para estes casos a raiz quadrada do erro quadrático médio apresentado na determinação da direção foi de 5.02° e erro máximo de 7.8° . Além disso, a técnica detectou, na maioria dos casos, a influência do ângulo de azimute da câmera em relação ao raio de propagação da onda. Ou seja, a técnica foi sensível na identificação do vetor deslocamento da onda em relação ao plano da imagem. (Figura 7a).

| Experimento | Inclinação da Câmera (°) | Período Gerado (segundos) | Período Obtido (segundos) | Altura da Onda | Direção Gerada | Direção Obtida |
|-------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0 | 0.5 | 0.4970 | 5 | 347 | 359.3 |
| 2 | 0 | 1 | 0.9672 | 13 | 347 | 185.3 |
| 3 | 0 | 1 | 0.9387 | 15 | 347 | 249.5 |
| 4 | 20.5 | 0.5 | 0.4970 | 3 | 351 | 353.3 |
| 5 | 20.5 | 0.5 | 0.5360 | 5 | 351 | 358.8 |
| 6 | 20.5 | 1 | 0.9939 | 13 | 351 | 352.7 |
| 7 | 20.5 | 1 | 1.0089 | 15 | 351 | 355.4 |
| 8 | 20.5 | 1.2 | 1.2251 | 10 | 351 | 352.5 |
| 9 | 20.5 | 1.5 | 1.5360 | 5 | 351 | 358.8 |

Tabela 1 Relação das Ondas Geradas no Tanque e Resultados Obtidos.

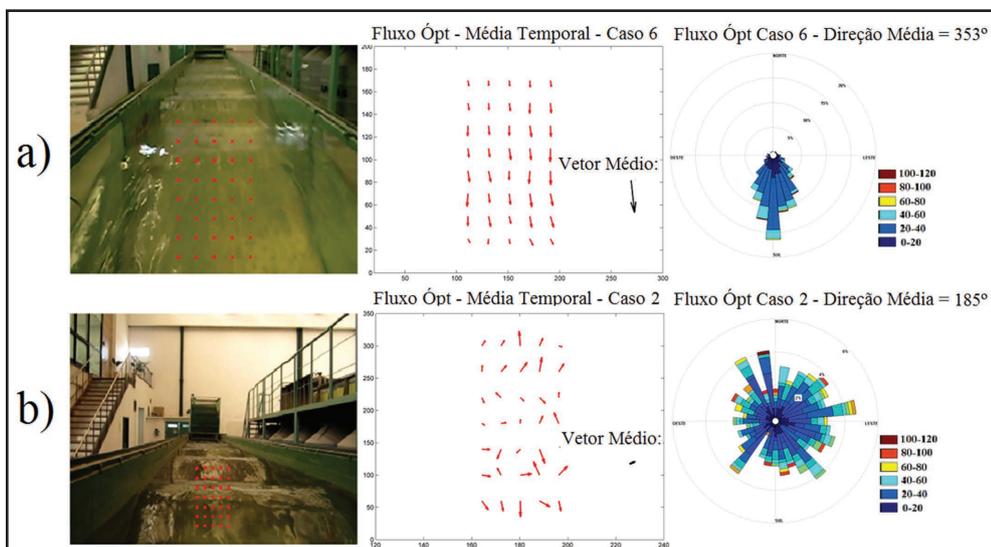


Figura 7 Comparação entre a projeção de perspectiva causada pela inclinação da câmera e sua consequência no fluxo óptico. (a) Câmera inclinada em 20.5° ; (b) inclinação da câmera de 0° . Ambos os casos para período de 1 segundo altura de 13 cm. Cada linha na Figura corresponde da esquerda para direita, à: frame do vídeo com a matriz de pontos de fluxo óptico; média temporal dos vetores do fluxo óptico para cada ponto e o vetor médio resultante e; participação relativa de cada faixa direcional na série temporal do fluxo óptico médio dos frames.

5 Discussão e Considerações Finais

O potencial do uso de imagens ópticas tanto para estudos de onda como para as mais variadas aplicações oceanográficas é, sem dúvida, enorme. A quantidade de informações que apenas uma imagem disponibiliza é notável para aplicações científicas. No caso da análise e medição de ondas superficiais de gravidade, o processamento de imagens é uma alternativa extremamente atrativa, tanto devido às possíveis informações extraídas, quanto pelo baixo custo financeiro e operacional envolvido. Porém, o fato de tantas técnicas diferentes terem sido desenvolvidas ao longo do tempo sem uma sistematização e padronização do método indica que o uso de imagens ópticas para a análise e medição dos parâmetros de ondas é uma tarefa experimental complicada.

Nesta fase do trabalho buscou-se especialmente o desenvolvimento de uma ferramenta de fácil implementação operacional, com configuração e manutenção simplificada e sem elevados custos computacionais envolvidos no processamento. Para tanto optou-se, a princípio, pela utilização de apenas uma câmera fixa em detrimento de um sistema estereoscópico.

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que de forma simples e prática é possível determinar os parâmetros de período e direção para ondas monocromáticas. É importante ressaltar que o trabalho, na sua atual fase, tem como objetivo avaliar qualitativamente o potencial e viabilidade do uso de imagens para medição de ondas. Neste sentido, os resultados obtidos mostram-se promissores.

O período da onda foi identificado de forma satisfatória em todos os casos. A oscilação do *brilho* em pontos fixos na imagem possui uma clara assinatura da passagem da onda. Porém em alguns casos, o espectro total resultante ainda continha picos com menor energia em frequências anômalas, possivelmente relacionados à reflexos pontuais de luz e/ou objetos na superfície da água. É importante desenvolver uma seleção cada vez mais restritiva em relação a estes picos espúrios, identificando quais estão relacionados à onda e os que não interessam para a análise.

A determinação da direção de propagação através do fluxo óptico no plano da imagem mostrou-se eficiente para casos de onda monocromática. Constatou-se que a inclinação do eixo óptico em relação à horizontal é fundamental para a percepção da passagem da onda por parte do sistema óptico. Nestes

casos, os vetores velocidade no plano da imagem possuem orientação fortemente influenciada pela passagem da onda, sendo possível identificar a direção de propagação. Apesar de em alguns pontos os vetores apresentarem uma pequena variação, a realização de médias estatísticas fornece uma direção resultante coerente com a direção principal de deslocamento da onda no plano da imagem. Portanto, sugere-se a partir dos resultados obtidos que a inclinação do eixo óptico em torno de 20° seja satisfatória para a otimização da metodologia proposta.

É importante ressaltar que as condições do laboratório não eram as ideais, uma vez que este é iluminado por diversas lâmpadas, além de haver várias janelas laterais causando uma iluminação bastante heterogênea. Adicionalmente, objetos ao redor do tanque provocavam inúmeros reflexos pontuais gerando um complicador na análise dos dados.

Espera-se que, em situações em ambientes abertos, iluminados naturalmente, parte destes problemas sejam minimizados. Porém, os resultados foram considerados bastante satisfatórios, indicando que o método proposto não requer uma configuração complexa do sistema de imageamento e de condições restritas de iluminação.

Naturalmente, medidas em campo apresentam variáveis que muitas vezes não podem ser controladas, como por exemplo rápida mudança das condições de iluminação, presença de fontes secundárias e, inclusive, condições meteorológicas desfavoráveis. Em vista disso, a abordagem baseia-se principalmente na adoção de uma metodologia de aquisição e processamento simplificada, diminuindo a necessidade de condições específicas. Estes fatores são importantes na viabilização de uma possível implementação operacional.

A metodologia não se baseia na relação direta do *brilho* na imagem com a inclinação da superfície com o objetivo de se obter um valor exato da inclinação, mas sim no padrão de oscilação temporal do *brilho*, e seus contrastes espaciais. Com isso, se não ocorrer variações drásticas das condições de iluminação durante o período de filmagem necessário para o processamento (70 segundos), a metodologia a princípio parece perfeitamente aplicável, independente das propriedades reflectivas e iluminação local. Além disso, a instalação em regiões mais elevadas, como plataforma, prédios etc, parece viável desde que a câmera utilizada tenha resolução suficiente para visualizar os padrões de *brilho* na imagem.

Outro fator interessante da abordagem proposta é que como a processamento se baseia na análise temporal de diferentes pixels na imagem e na determinação dos contrastes espaciais (cristas) em porções relativamente pequenas da imagem, a área visualizada pela câmera não necessita ser grande. Sendo assim, o emprego da técnica em regiões com predominância de grandes comprimentos de onda é viável, já os períodos são determinados através da análise espectral de séries temporais em pontos fixos na imagem e não da visualização da onda inteira no espaço.

Como futuras implementações, resultados preliminares indicam que a altura de ondas monocromáticas também podem ser obtidas com acurácia aceitável. Esforços neste sentido estão sendo realizados para sua futura implementação. Também, estão sendo analisadas imagens de ondas monocromáticas bimodais, se propagando em direções distintas. Resultados indicam que tanto a direção quanto o período, também, podem ser sacados de forma satisfatória. Por fim, ondas irregulares multimodais serão em breve analisadas.

6 Referências

- Banner, M.; Jones, S.F & Trinder, J.C. 1989. Wavenumber Spectra of Short Gravity Waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 198: 321-344.
- Benetazzo, A. 2006. Measurement of Short Water Waves Using Stereo Matched Image Sequences. *Coastal Engineering*, 53: 1013-1032.
- Benetazzo, A.; Fedele, F.; Gallego, G.; Shih, P-C & Yezzi, A. 2012. Offshore Stereo Measurements of Gravity Waves. *Coastal Engineering*, 64: 127-138.
- Bezryadin, S.; Bourov, P & Ilinih, D. 2007. Brightness Calculation in Digital Image Processing Sergey. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TECHNOLOGIES FOR DIGITAL FULFILLMENT, Las Vegas, March, p.10-15.
- Cote, L.J.; Davies, J.O.; Marks, W.; McGough, R.J.; Mehr, E.; Pierson, W.J.; Ropek, J.F.; Stephenson, G. & Vetter, R.C. 1960. The directional spectrum of a wind generated sea as determined from data obtained by the Stereo Wave Observation Project. *Meteorological Papers*, 2(6): 1-88.
- Cox, C. & Munk, W. 1954a. Statistics of the Sea Surface Derived from Sun Glitter. *Journal Marine Research*, 13(2): 198-227.
- Cox, C. & Munk, W. 1954b. Measurements of the Roughness of the Sea Surface From Photographs of the Sun Glitter. *Journal of the Optics Society of America*, 44(11): 838-850.
- Holthuijsen, L.H. 1983a. Stereophotography of Ocean Waves. *Applied Ocean Research*, 5(4): 204-209.
- Holthuijsen, L.H. 1983b. Observations of the directional distribution of ocean wave energy. *Journal of Physical Oceanography*, 13: 816-827.
- Jähne, B. 1993. *Spatio-Temporal Image Processing – Theory and Scientific Applications*. 1 ed. Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag. 208 p.
- Jähne, B.; Klinke, J & Waas, S. 1994. Imaging of Short Ocean Wind Waves: A Critical Theoretical Review. *Journal of the Optics Society of America*, 11(8):2197–2209.
- Kohlschütter, E. 1906. Die Forschungsreise S. M. S. Planet, Band 2. Stereophotogrammetrische Aufnahmen. *Ann. Hydrographie*, 34, 219p.
- Laas, W. 1905. Photographische Messung der Meereswellen. *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, 49: 1889, 1937, 1976.
- Laas, W. 1921. Photographische Messung der Meereswellen. Veröffentlichungen Institut *Meereskunde Reihe, A(7)*.
- Mironov, A.S.; Yurovskaya, M.V.; Dulov, V.A.; Hauser, D. & Guérin, C.A. 2012. Statistical Characterization of Short Wind Waves from Stereo Images of the Sea Surface. *Journal of Geophysical Research*, 117(C00J35): 1-16. doi: 10.1029/2011JC007860.
- Santel, F.; Linder, W & Heipke, C. 2004. Stereoscopic 3D-Image Analysis of Sea Surface. In: ISPRS COMISION SYMPOSIUM, 5, *Proceedings*, Istanbul, July, p. 708-712.
- Schumacher, A. 1939. Stereophotogrammetrische Wellenaufnahmen. In: WISSENSCHAFTLICHE ERGEBNISSE DER DEUTSCHEN ATLANTISCHEN EXPEDITION AUF DEM FORSCHUNGS - UND VERMESSUNGSSCHIFF 'METEOR' 1925 - 1927. *Ozeanographische Sonderuntersuchungen*, de Gruyter, Berlin, 7:2.
- Shemdin, O.H.; Tran, H.M & Wu, S.C. 1988. Directional Measurements of Short Ocean Waves with Stereophotography. *Journal of Geophysical Research*, 93(C11): 13891-13901.
- Stilwell, D. Jr. 1969. Directional Energy Spectra of the Sea From Photographs. *Journal of Geophysical Research*, 74(8): 1974-1986.
- Wanek, J.M & Wu, C.H. 2006. Automated Trinocular Stereo Imaging System for Three-dimensional Surface Wave Measurements. *Ocean Engineering*, 33: 723–747.
- Welch, P.D. 1967. The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms. *Institute of Electrical and Electronic Engineers*, 15: 70-73.