



Técnicas Ópticas para Identificação de Mares Regulares Cruzados Optical Techniques for Regular Cross Sea Identification

Henrique Rapizo¹; Victor D'Ávila²; Nelson Violante-Carvalho¹;
Uggo Pinho³; Jefferson Pereira¹ & Carlos Eduardo Parente¹

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Laboratório de Instrumentação Oceanográfica LIOc,
Programa de Engenharia Naval e Oceânica, PENO. Av. Athos da Silveira Ramos 149, 21945970 Rio de Janeiro, RJ, Brasil

²Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Oceanografia FAOC

³Petrobras, Segmento de Oceanografia Operacional OCEANOP

E-mails: hrap.gomes@gmail.com; victor.a.avila.uerj@gmail.com; n_violante@oceanica.ufrj.br; uggo.f.pinho@gmail.com; jeff.pereira@oceanica.ufrj.br; parente@oceanica.ufrj.br

Recebido em: 08/07/2013 Aprovado em: 16/12/2014

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2014_2_195_205

Resumo

Um método de medição óptica de ondas superficiais de gravidade é desenvolvido e aplicado para ondas regulares bimodais. O método consiste na análise dos padrões espaciais e temporais do *brilho* no plano da imagem ao longo de uma sequência de frames. As medições são configuradas objetivando simplificar sua aplicação operacional. Para tanto emprega-se apenas um ponto de vista da cena visualizada, o que representa uma considerável vantagem em detrimento das configurações estereoscópicas usualmente apresentadas na literatura. Os resultados demonstram que é possível identificar o período e a direção de propagação de cada uma das componentes de onda.

Palavras-chave: processamento de imagens ópticas; ondas superficiais de gravidade

Abstract

A new optical technique is presented and applied to measure regular, bichromatic surface waves propagating in different directions in a tank. The method is based on the patterns of spatio-temporal variations of brightness over sequential frames. A single camera is employed, allowing a simple and straightforward configuration well-suited for operational applications, therefore avoiding the technical complications typical of stereoscopic measurements. The initial results are promising, with directions of propagation and wave periods well defined for each wave train.

Keywords: optical image processing; surface gravity waves

1 Introdução

Técnicas ópticas para medições da elevação da superfície do oceano vêm sendo empregadas há mais de um século (*e.g.* Kohlshütter, 1906; Laas, 1905), com diversos estudos que apontam para seu grande potencial de abrangência espacial de informações. É possível destacar diversas potencialidades de sua utilização, desde baixo custo financeiro, medições não intrusivas, facilidade de manutenção e operacionalização, além da grande abrangência espacial e temporal de informações a respeito do campo de ondas (Jähne, 1993).

Nos primeiros trabalhos publicados, até os anos 1970, as fotografias eram processadas manualmente, o que envolvia elevado consumo de tempo, possibilitando a validação de apenas um pequeno número de imagens. A densidade óptica, que pode ser entendida como a densidade de energia luminosa emitida por determinada porção da superfície imageada (Stilwell, 1969), era obtida através da análise cuidadosa dos negativos fotográficos em laboratórios. Com advento do processamento digital em sistemas automatizados, a análise de imagens tornou esta tarefa menos laboriosa e significativamente mais rápida. Os vídeos digitais possibilitaram a análise de um grande número de imagens por segundo, permitindo estender a análise ao domínio temporal, com alta resolução.

Apesar de alguns importantes trabalhos terem utilizado apenas uma câmera (*e.g.* Cox & Munk, 1954a, 1954b; Stilwell, 1969; Stilwell & Pilon, 1977; Monaldo & Kasevich, 1980; Cox, 1958; Jähne & Riemer, 1990), sem dúvida parte significativa dos trabalhos realizados adotaram sistemas estereoscópicos (como por exemplo Holthuijsen, 1983a, 1983b; Shemdin *et al.*, 1988; Banner *et al.*, 1989; Santel, 2004; Benetazzo, 2012; Wanek & Wu, 2006; Mironov *et al.*, 2012).

Os modelos de reflexão baseiam-se, de forma geral, no fato de água apresentar uma superfície especular altamente refletiva. Nesses modelos a irradiância obtida no plano da imagem passa a ser função exclusivamente da inclinação da onda e, de acordo com a inclinação da câmera em relação à superfície, esta relação pode ser considerada linear (Monaldo & Kasevich, 1981). Porém, a maior desvantagem do método é que ele obrigatoriamente exige condições bastante restritivas, representadas pela variação homogênea de uma iluminação isotrópica do céu ou variação em apenas uma direção. Estas condições seriam alcançadas com um céu totalmente desprovido ou totalmente coberto por nuvens (homogeneamente nublado).

Por outro lado, os modelos de refração da luz, baseados no caráter translúcido da água, necessitam de uma configuração de iluminação artificial extremamente complicada de se implementar em campo, já que a fonte de luz deve estar em um dos meios (água ou ar) e o dispositivo de imageamento no outro (Jähne *et al.*, 1994).

Sistemas estereoscópicos permitem descrever completamente a superfície do oceano, porém sua implementação operacional é bem mais complexa, já que requerem um sensível sistema de acoplamento entre as câmeras, *i.e.* elevado sincronismo entre as câmeras (Holthuijsen, 1983a), além da potencialização do clássico problema de correspondência quando aplicados à uma superfície altamente dinâmica e muitas vezes com caráter caótico, como o oceano.

Tendo em vista a limitação das técnicas tradicionais dos modelos de reflexão e refração da luz e a dificuldade de implementação operacional dos sistemas estereoscópicos, o presente estudo tem como objetivo propor uma ferramenta óptica de medição de ondas de fácil implementação operacional, a fim de se extrair os principais parâmetros de onda sem grandes restrições quanto à iluminação natural. Cabe destacar que uma ferramenta com estas características é de fundamental importância para a engenharia costeira e oceânica, assim como quaisquer atividades realizadas no meio marinho.

O princípio da técnica aqui proposta passa pela análise dos padrões espaciais e temporais do *brilho* no plano da imagem, relacionando-os com os parâmetros de período e direção de propagação de ondas. O presente estudo aborda casos onde dois trens de ondas regulares coexistem, portanto formando um sistema bicromático. O principal objetivo de se utilizar este tipo de configuração espectral é verificar se a técnica é capaz de distinguir as duas componentes que se propagam com direções e características distintas. Para isto realizou-se experimentos em um tanque oceânico voltado para simulações de sistemas hidrodinâmicos complexos, representando de forma realística em escala reduzida as condições de ondas no oceano.

2 Metodologia

2.1 Período de Onda

A detecção do período da onda está fundamentalmente relacionada aos padrões temporais de oscilação do *brilho* na imagem. Segundo Stilwell (1969), o *brilho* captado pela

câmera é função da orientação da superfície visualizada, ou seja, de sua inclinação.

Desta forma se representarmos a superfície livre η do oceano na presença de uma onda por:

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

as duas componentes, nos eixos x e y de inclinação são, respectivamente:

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = \eta_x = -ak \cos \theta \sin(kx \cos \theta + ky \sin \theta - \omega t + \varepsilon) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial y} = \eta_y = -ak \sin \theta \sin(kx \cos \theta + ky \sin \theta - \omega t + \varepsilon)$$

Ou seja, o período de oscilação destes três parâmetros é rigorosamente o mesmo.

Com isso, sendo o *brilho* uma função combinada das eqs. (2), a análise espectral deste parâmetro da imagem pode fornecer os períodos das principais componentes de onda envolvidas.

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

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

Naturalmente, o *brilho* pode conter outras influências, como a refração da luz de objetos do fundo, reflexos pontuais de luz causados por quaisquer corpos ao redor da superfície ou fontes secundárias de iluminação. Estes fatores podem gerar energia espectral em outras frequências, porém, dificilmente ocorrerá de forma homogênea em todos os pontos da superfície da área imageada. Em contrapartida, a influência da oscilação da superfície da água causada pela passagem da onda estará diretamente associada à oscilação do *brilho*, captada pela câmera. Desta forma, a correlação entre pontos em coordenadas distintas na imagem pode revelar quais frequências de oscilação estão relacionadas à passagem da onda e quais não estão.

Dois métodos estatísticos foram empregados para identificar os períodos de onda: primeiro a multiplicação de um grande número de espectros em variados pontos da imagem, o que tende a eliminar energias de frequências espúrias; segundo,

computando a coerência entre os pontos 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.

2.2 Direção de Propagação

O *brilho* no plano da imagem pode ser representado em uma escala de valores de cinza. Existem diversas técnicas digitais para obtenção deste parâmetro (Bezryadin *et al.*, 2007). Neste trabalho utilizou-se os modelos de *luminância* e *BCH* (*Brightness, Chroma, Hue*). A análise dos padrões espacial e temporal do *brilho* permite interessantes estimativas de movimento ao longo da sequência de imagens. A técnica de fluxo óptico (Gibson, 1950), por exemplo, estima o movimento diretamente dos valores de cinza (*brilho*) encontrados na imagem.

Apesar do fluxo óptico ser extremamente interessante para inferir movimentos reais da cena e, conseqüentemente, do campo de ondas (Jähne, 1993), apresenta como limitação principal a impossibilidade de detectar a direção de propagação de campos multi-modais. Como a técnica é baseada no gradiente espacial dos valores de brilho, somente a direção resultante de propagação é determinada, ou seja, uma direção média, impossibilitando assim descrever a direção de propagação de cada componente de onda.

Tendo em vista a limitação do tradicional método de fluxo óptico e dispondo-se de apenas um ponto de vista da cena, ou seja uma única câmera, criou-se um método de determinação de direção de propagação de cada componente de onda através da análise espectral temporal para diferentes pontos na imagem, denominado *método de direção de chegada do brilho*. É apresentada na Figura 1 a direção de chegada de uma onda medida através da diferença de fase espectral em um *array* linear de sensores pontuais, em uma analogia aos métodos utilizados na acústica submarina (Burdic, 1984). A resolução da direção será maior quanto maior o número de sensores utilizados.

A diferença de fase a partir dos espectros temporais é dada por:

$$\phi_i = a \tan\left(\frac{b_f}{a_f}\right) \quad (4)$$

onde a_f e b_f são os coeficientes de *Fourier* do cruzamento espectral entre duas séries. A fase espacial, para um *array* com n pontos é dada por:

$$\phi_e(n) = k(n-1)d \cos \theta \quad (5)$$

onde d é a distância entre os pontos no *array*, que deve ser menor que metade do comprimento de onda mínimo ($L/2$), respeitando o teorema de Nyquist. Quanto maior o *array* maior a resolução espacial. Neste caso a analogia entre tempo e espaço é completa, ou seja, a fase espacial entre os pontos nesta configuração é analogamente representada pela fase temporal. Com isso pode-se determinar a direção de propagação da onda utilizando-se análises temporais cruzadas entre dois pontos espacialmente separados.

Baseando-se neste conceito e no fato de que o *brilho* no plano da imagem é função da inclinação da onda, é possível avaliar a diferença da fase espectral da variação do *brilho* entre diferentes pontos na imagem, permitindo estimar a direção de propagação de cada componente. Torna-se necessário utilizar pontos próximos no referencial de coordenadas da imagem, já que as condições de iluminação podem não ser homogêneas espacialmente. A quantidade de informações espaciais e temporais contida em uma imagem digital é uma oportunidade única de aplicação desta técnica para avaliar a direção das ondas, já que se dispõe de um grande número de sensores pontuais (pixels). A viabilidade deste procedimento com sensores convencionais (por exemplo, boias de elevação) seria praticamente nula.

Com base nestes princípios teóricos, fixou-se uma configuração de pontos na imagem de tal forma a possibilitar a análise das diferenças de fase na variação temporal do *brilho* entre eles. As opções de formas geométricas de organização dos pontos são inúmeras. No presente estudo, diversos *arrays* lineares foram dispostos, formando uma espécie de "rosa de pontos" (Figura 2). O espaçamento entre os pontos deve sempre respeitar o comprimento de onda L mínimo a ser analisado, seguindo o teorema de Nyquist espacial:

$$d \leq \frac{1}{2} L \quad (6)$$

onde d é o espaçamento entre os pontos de um *array*.

A identificação das coordenadas reais de um ponto na imagem é feita através da reconstrução geométrica da cena, representada pela transformação de coordenadas da imagem para coordenadas reais.

Este procedimento é realizado através das matrizes de rotação e translação e, necessariamente, deve se ter conhecimento prévio de três parâmetros de

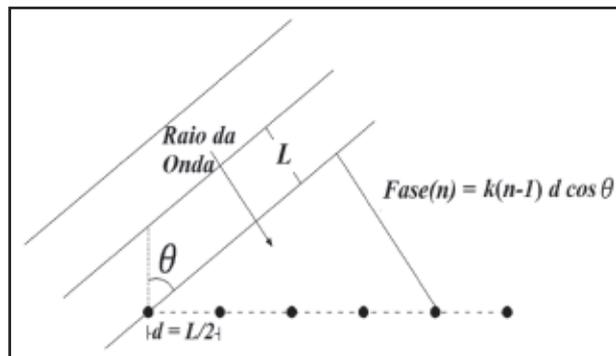


Figura 1: Método de determinação da direção de propagação da onda θ através da diferença de fase em um *array* linear de sensores pontuais.

instalação e configuração do sistema de imageamento: a altura de instalação (H_c), representada pela cota da lente até o nível de água; a inclinação da câmera (ζ), dada pelo ângulo formado entre os eixos óptico e horizontal e a abertura angular (Ab). O desenvolvimento matemático desta transformação e do mapeamento dos pontos da cena em coordenadas reais são descritos em Rapizo (2013).

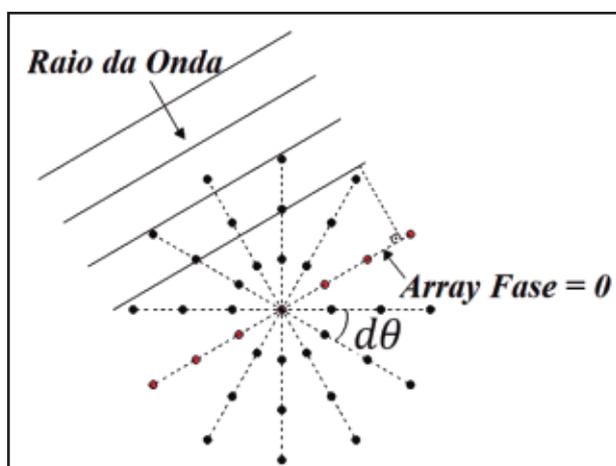


Figura 2 Representação esquemática da "rosa de pontos" composta por *arrays* lineares. O *array* de fase média igual a zero, composto pelos sensores vermelhos, indica a direção de propagação da onda.

Calculou-se a fase espectral entre todos os pontos adjacentes de um mesmo *array*, e obteve-se, posteriormente, a média entre os valores obtidos. Com isso, cada *array* de pontos apresenta uma fase média representativa.

Uma onda se propagando perpendicularmente (ou seja com as cristas paralelas) à reta formada por dois pontos, irá apresentar diferença de fase igual a zero, tanto em relação à elevação quanto à inclinação (*brilho*). Desta forma, o *array* que estiver disposto de forma perpendicular ao vetor direção de propagação da onda, possuirá diferença de fase média igual ou próxima de zero, e a direção da onda será revelada. A resolução em direção $d\theta$ utilizada foi de 10° . Consequentemente, a "rosa de pontos" possui 18 *arrays*.

Naturalmente, ocorre uma ambiguidade de sentido. Porém, o sentido em que está localizado os contornos, como a localização da praia artificial nos casos experimentais aqui apresentados, pode eliminar esta ambiguidade. Nos casos estudados no presente trabalho, os experimentos realizados possuíam uma praia artificial que atuava como um contorno, através do qual pode-se eliminar esta ambiguidade de direção existente.

2.3 Experimento

São apresentados os resultados obtidos no tanque de ondas do Laboratório de Tecnologia Oceânica (LabOceano) da COPPE/UFRJ (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro). O tanque possui dimensões de 45 metros de comprimento por 30 metros de largura. A profundidade é de 15 metros, com um poço central com 10 metros adicionais, localizado à 20 metros de distância dos batedores de geração. O tanque possui duas praias, uma localizada ao final de sua extensão, para evitar a reflexão de ondas na direção contrária, e outra em uma das laterais (Figura 3). Foram geradas ondas regulares bimodais, coexistindo dois sistemas de onda com períodos, alturas e direções de propagação distintos.

Para a realização das filmagens utilizou-se uma câmera SONY HDR-SR10, com sensor CMOS e taxa de aquisição de $29.97 \text{ frames.s}^{-1}$. As imagens geradas possuem dimensões de 720×486 pixels. A altura de instalação da câmera H_c foi de 1.425 metros de altura do nível da água, com inclinação do eixo óptico em relação ao horizontal ξ de 12.6° (Figura 4). Adicionalmente, o equipamento foi instalado de tal forma que os eixos de visada e longitudinal do tanque formavam um ângulo de 5° , que pode ser considerado o azimute.

A análise espectral (período e direção de chegada) foi feita através de 478 pontos fixos na

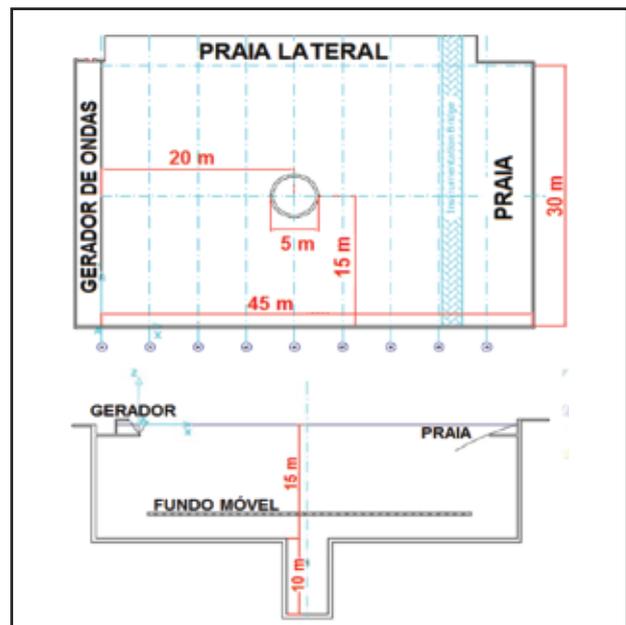


Figura 3 Dimensões do tanque de ondas do Laboratório de Tecnologia Oceânica (LabOceano).

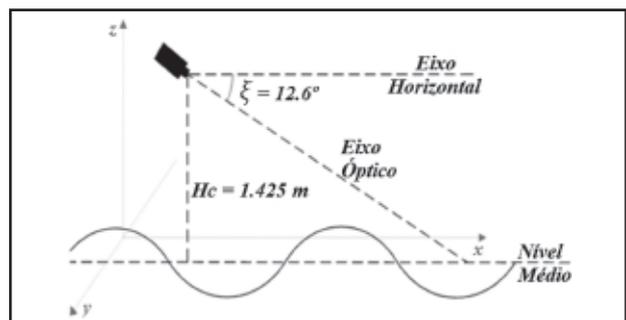


Figura 4 Representação esquemática dos parâmetros de instalação da câmera: H_c é a altura da câmera e ξ é o ângulo de inclinação da câmera com o eixo horizontal.

imagem. Destes, 297 em uma matriz retangular de dimensões 9×33 , aproveitando grande parte da região de água visualizada, e 181 em uma "rosa de pontos", com círculos concêntricos, composta por 18 *arrays* lineares (Figura 5). Os períodos de onda são determinados através da correlação de todos os espectros individuais obtidos nos 478 pontos. Com isso, tem-se um espectro total representativo de cada caso analisado.

Já a "rosa de pontos" utiliza os espectros de cada ponto para inferir a direção de chegada de componente de onda (descrito na seção 2.2). Cada ponto fornece uma série temporal de *brilho*, que é analisada espectralmente gerando um período de pico espectral de brilho corresponde ao período de oscilação da onda. A direção de cada componente de onda identificada é dada pelo *array* que apresente diferença de fase média entre os pontos mais próxima

de 0, sendo a resolução de direção de 10°. A Figura 5 apresenta a configuração de todos os pontos fixos utilizados para o processamento.

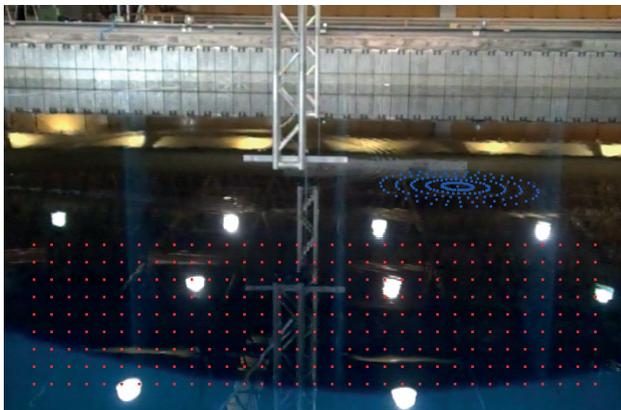


Figura 5 Pontos fixos na imagem utilizados para a análise espectral. Os pontos vermelhos representam os pixels utilizados apenas para determinação dos períodos de onda. Por sua vez, os pontos azuis representam a "rosa de pontos" utilizada, além de determinar os períodos, também para a identificação das direções de propagação das componentes de onda.

A "rosa dos pontos", por analisar os contrastes formados pelas cristas das ondas para determinar a sua direção de chegada, deve ser posicionada em uma região mais afastada, onde a perspectiva de projeção é maior, assim como os contrastes das feições características das ondas. A matriz retangular, por sua vez, foi usada a fim de se aproveitar a grande região da superfície de água na parte inferior da imagem. Com isso aumenta-se a acurácia estatística na determinação dos períodos de onda.

Foram realizados 8 experimentos, todos casos bimodais com períodos e direções de propagação distintos. Os períodos variaram entre 0.5 e 3 segundos e as alturas entre 3 e 15 centímetros. A Tabela 1 apresenta as características de todas as ondas geradas, com seus períodos, alturas e a direções. A direção de propagação de 180° representa componente sem angulação em relação ao eixo longitudinal do tanque.

3 Resultados e Discussão

3.1 Determinação do Período de Onda

A Tabela 2 apresenta as medições dos períodos de onda, juntamente com os valores gerados no batedor do tanque. É importante ressaltar que, no atual estágio de desenvolvimento da técnica aqui discutida, não se busca determinar a altura de onda das componentes, nem tão pouco qual

Caso	Altura H [cm]	Período T [seg]	Direção [°]
1	H ₁ = 10 H ₂ = 10	T ₁ = 1 T ₂ = 3	D ₁ = 180 D ₂ = 150
2	H ₁ = 5 H ₂ = 15	T ₁ = 1 T ₂ = 3	D ₁ = 180 D ₂ = 135
3	H ₁ = 5 H ₂ = 15	T ₁ = 3 T ₂ = 1	D ₁ = 180 D ₂ = 120
4	H ₁ = 5 H ₂ = 8	T ₁ = 1 T ₂ = 2	D ₁ = 195 D ₂ = 165
5	H ₁ = 10 H ₂ = 10	T ₁ = 0.7 T ₂ = 2	D ₁ = 200 D ₂ = 160
6	H ₁ = 5 H ₂ = 15	T ₁ = 0.7 T ₂ = 2	D ₁ = 180 D ₂ = 135
7	H ₁ = 5 H ₂ = 8	T ₁ = 0.7 T ₂ = 1	D ₁ = 195 D ₂ = 165
8	H ₁ = 10 H ₂ = 15	T ₁ = 0.7 T ₂ = 2	D ₁ = 200 D ₂ = 160

Tabela 1 Relação das ondas geradas no experimento.

das componentes de frequência apresenta a maior energia espectral. Busca-se, todavia, identificar quais são as frequências de oscilação da superfície livre geradas pela passagem de cada componente e obter, posteriormente, as suas respectivas direções de propagação. Neste sentido o processamento foi bem sucedido na identificação precisa dos dois períodos de onda, com exceção de apenas um caso (Tabela 2, Caso 3, discutido mais à frente).

A Figura 6 mostra o espectro obtido para o caso 6. Observa-se a clara distinção dos dois picos de onda no espectro de *brilho*. Neste caso específico, as energias apresentadas são condizentes com as alturas das ondas geradas. O maior período, 2 segundos, corresponde à onda de 15 centímetros de altura, enquanto o menor, de 0.7 segundos, à onda de 5 centímetros. A princípio, esta relação parece ter sido bem representada no espectro de *brilho*. A participação relativa da energia de cada pico espectral, porém, não corresponde ao espectro de onda em todos os casos.

Em teoria, o *brilho* na imagem está relacionado com a inclinação da superfície. Desta forma, as maiores energias no espectro de *brilho* estariam, a princípio, associadas às componentes de onda que apresentam maiores variações de valores de inclinação. Ou seja, quanto maior a

Caso	Período T Gerado [seg]	Período T Obtido [seg]
1	$T_1 = 1$ $T_2 = 3$	$T_1 = 0.994$ $T_2 = 3.072$
2	$T_1 = 1$ $T_2 = 3$	$T_1 = 0.994$ $T_2 = 3.072$
3	$T_1 = 3$ $T_2 = 1$	$T_1 = 0.497$ $T_2 = 0.994$
4	$T_1 = 1$ $T_2 = 2$	$T_1 = 0.994$ $T_2 = 1.988$
5	$T_1 = 0.7$ $T_2 = 2$	$T_1 = 0.735$ $T_2 = 1.988$
6	$T_1 = 0.7$ $T_2 = 2$	$T_1 = 0.690$ $T_2 = 1.988$
7	$T_1 = 0.7$ $T_2 = 1$	$T_1 = 0.768$ $T_2 = 0.994$
8	$T_1 = 0.7$ $T_2 = 2$	$T_1 = 0.690$ $T_2 = 1.988$

Tabela 2 Relação dos Períodos das ondas geradas e os Períodos obtidos pelo processamento.

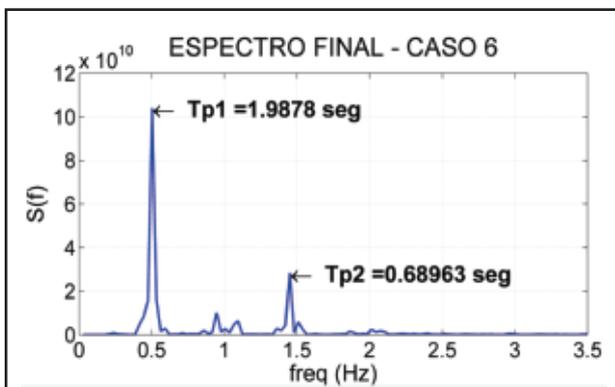


Figura 6 Espectro Total de brilho $B(f)$ obtido para o Caso 6. Ondas: $T_1 = 0.7\text{s}$; $T_2 = 2\text{s}$; $H_1 = 5$; $H_2 = 15$.

inclinação da onda, representada pela razão entre altura e comprimento de onda (H/L) (esbeltez ou *steepness*), maior a energia no espectro associada à sua frequência.

Com isso, torna-se interessante não apenas olhar para a altura da onda para tentar entender melhor os valores de energia obtidos no processamento, mas também analisar a esbeltez de cada componente gerada. No caso 6 (Figura 6) a esbeltez da onda 1 ($T = 0.7 \text{ s}$ e $H = 5 \text{ cm}$) é de 0.0654 e da onda 2 ($T = 2 \text{ s}$ e $H = 15 \text{ cm}$) é igual a 0.0240. Ou seja, a esbeltez da

onda de menor altura é maior e o espectro de *brilho* deveria, em teoria, apresentar uma energia maior para a frequência de 0.7 segundos.

Para entender melhor as energias espectrais apresentadas, torna-se necessário analisar as condições de iluminação do laboratório durante o ensaio. O tanque de ondas é composto por diversas linhas longitudinais de lâmpadas que geram zonas de fortes reflexos pontuais na superfície da água, como se pode notar na Figura 7. Com a propagação da onda a 180° , criam-se linhas de luminosidade intensa na superfície da água (Figura 4). Se a direção de propagação da onda apresentar um ângulo em relação à estas linhas de lâmpadas, estas linhas de reflexo oscilam com a frequência da onda (Figura 7B). Naturalmente, por serem regiões de valor de *brilho* muito elevado, as amplitudes de oscilação deste parâmetro tornam-se muito grandes.

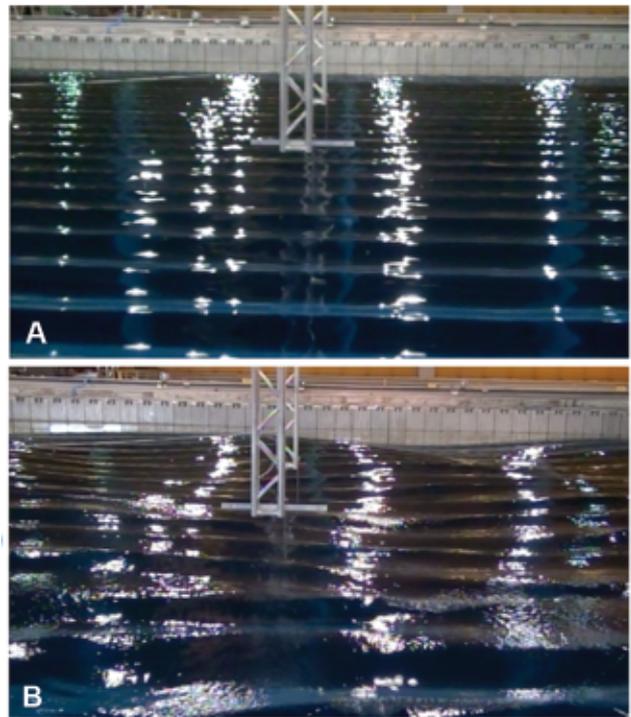


Figura 7 Comportamento das linhas de reflexos na superfície da água formadas pelas lâmpadas de teto. a) onda se propagando com direção de 180° ; b) adição de uma onda se propagando com direção de 135° .

A partir destas considerações pode-se compreender melhor os níveis de energia espectrais apresentados, como no caso 6, por exemplo, representado pela imagem da Figura 7B. A onda de dois segundos é a onda que possui direção de 135° , ou seja, apresenta um ângulo de 45° em relação às linhas de lâmpadas. Com isso o *brilho* intenso dos reflexos lineares na superfície da água oscila

com o período desta onda, apresentando grandes amplitudes. Isto faz com que a energia associada a esta frequência possua um valor elevado no espectro da Figura 6.

O caso número 3 foi o único em que não foi possível identificar um dos períodos de onda. O período de três segundos não aparece entre os dois períodos de maior energia no espectro. A direção da onda de menor período, um segundo, foi a com maior ângulo entre todas as ondas geradas. Pode-se observar pelo vídeo que ocorre reflexão na parede lateral do tanque com a consequente geração de outras frequências de onda a partir da interferência da onda refletida. Este fato cria uma configuração desorganizada da superfície da água, com outras frequências de onda envolvidas. Provavelmente, a frequência de 0.497 segundos, que aparece como segundo maior pico, está relacionado com alguma frequência gerada a partir destas reflexões e consequentes interferências ondulatórias. Na Figura 8 é possível observar dois instantes diferentes deste caso. O primeiro com as ondas ainda com um padrão organizado, antes da reflexão e, no segundo, após a reflexão, onde observa-se um padrão desorganizado da superfície.

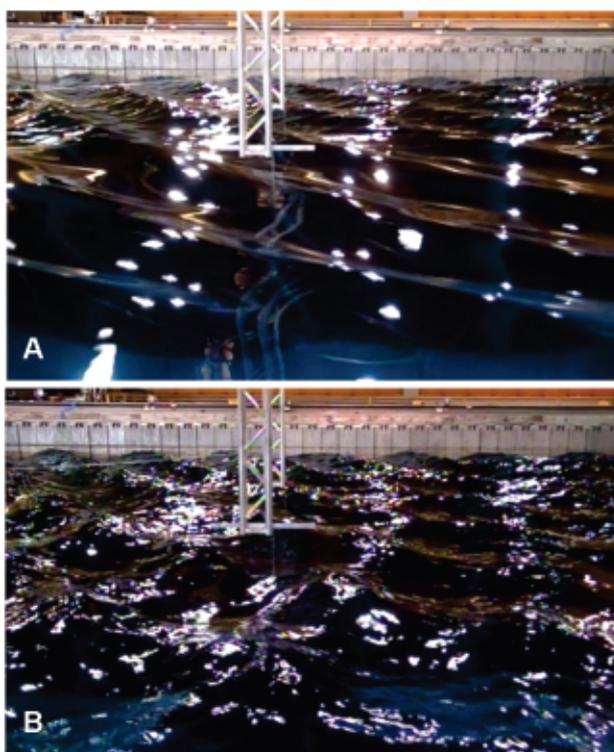


Figura 8 Dois instantes diferentes para o caso 3: a) antes da reflexão das ondas na parede lateral e b) após a reflexão, provocando interferência ondulatória.

Portanto, com exceção de um dos casos, o processamento das imagens mostrou-se eficiente na detecção dos períodos das duas componentes geradas no tanque.

3.2 Determinação da Direção de Propagação

Na Tabela 3 os valores medidos de direção de cada componente, através da direção de chegada do *brilho*, são apresentados, juntamente com a direção de propagação das ondas configuradas no batedor.

Analisando os resultados da Tabela 3, pode-se constatar que a técnica de diferença de fase mostra-se eficiente na identificação da direção de propagação das componentes para casos bimodais. Com exceção do Caso 3 (ambas componentes) e do Caso 4 (uma das componentes), todas as ondas analisadas tiveram a direção de propagação identificadas. Em alguns casos, como por exemplo os casos 2, 5 e 7, as duas direções de onda foram quantitativamente obtidas com precisão, levando-se em consideração a resolução direcional de 10° utilizada.

O caso 3, em particular, como já mencionado anteriormente, apresentou um padrão peculiar na propagação das ondas envolvidas, devido ao elevado ângulo de propagação da componente 2 e consequente reflexão na parede lateral e formação de interferência ondulatória no experimento. No caso 4, a componente de período de 2 segundos não teve a sua direção de propagação (165°) identificada muito possivelmente devido a pequena esbelteza da onda (0.0128) e, consequentemente, um contraste de cristas praticamente imperceptível no vídeo (Figura 9). Nota-se que a onda mais curta ($T = 1$ segundo) é claramente visível, enquanto a onda mais longa não apresenta nenhuma característica marcante na imagem.

A Figura 10 exemplifica as etapas de determinação da diferença de fase espectral entre dois pontos adjacentes de um *array* constituente da "rosa de pontos", para o caso 6, com ondas de período 2 e 0.7 segundos. Observa-se que, apesar da presença de diversos picos de energia, possivelmente associados à reflexos intensos de luz, em ambos os espectros, a coerência para a frequência associada à onda apresenta um valor elevado, acima de 0.8. O critério baseado em um valor alto de coerência para o período da onda, permite selecionar a fase obtida para a identificação da direção. Os valores de coerência inferiores à 0.8 não são utilizados no processamento. É interessante notar a assinatura

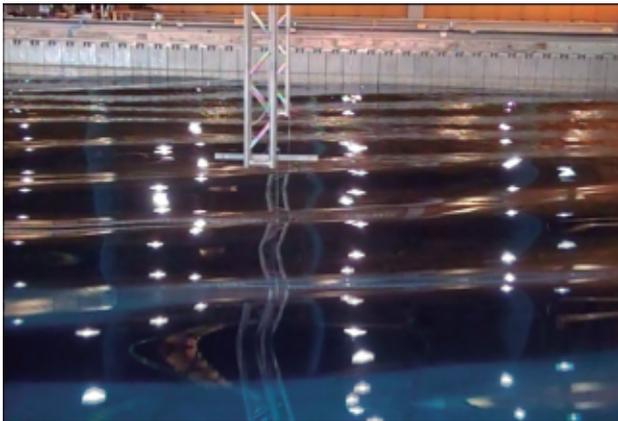


Figura 9 Frame do caso 4. A onda mais curta, $T = 1$ seg., é claramente visível, enquanto que a onda mais longa, $T = 2$ seg., é praticamente imperceptível.

Caso	Direção Gerada [°]	Direção Por Frequência [°]
1	$D_1 = 180$ $D_2 = 150$	$D_1 = 200$ $D_2 = 170$
2	$D_1 = 180$ $D_2 = 135$	$D_1 = 180$ $D_2 = 130$
3	$D_1 = 180$ $D_2 = 120$	$D_1 = 240$ $D_2 = 190$
4	$D_1 = 195$ $D_2 = 165$	$D_1 = 190$ $D_2 = 200$
5	$D_1 = 200$ $D_2 = 160$	$D_1 = 210$ $D_2 = 160$
6	$D_1 = 180$ $D_2 = 135$	$D_1 = 190$ $D_2 = 170$
7	$D_1 = 195$ $D_2 = 165$	$D_1 = 190$ $D_2 = 160$
8	$D_1 = 200$ $D_2 = 160$	$D_1 = 210$ $D_2 = 150$

Tabela 3 Resultados das Direções Obtidas no Processamento

clara da coerência elevada no gráfico da diferença de fase (Figura 10d em destaque), onde ocorre uma constância de seu valor.

Com os resultados obtidos e a identificação das possíveis causas dos erros na determinação de direção constatou-se que foi possível identificar de forma coerente a direção de propagação das duas componentes dos mares bimodais. Em alguns casos identificou-se com exatidão a direção de propagação, levando-se em consideração a resolução empregada de 10° . O caso 4, em

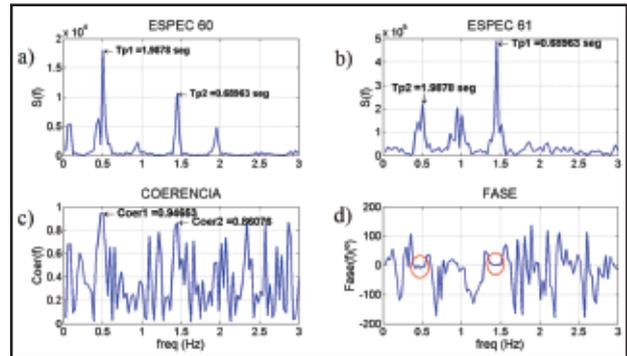


Figura 10 Exemplo de determinação da coerência e fase espectral entre dois pontos adjacentes em um mesmo array. a) Espectro de brilho de um dos pontos; b) Espectro do ponto adjacente; c) Coerência entre os pontos; d) Fase, onde círculo vermelho destaca a assinatura de constância na fase indicando alta coerência entre os pontos.

que a direção de uma das componentes não foi identificada de forma coerente, pode indicar uma limitação da técnica em função da pequena esbelteza de determinadas componentes envolvidas.

4 Conclusões

Especificamente para a análise e medição de ondas, o potencial do uso de métodos de imageamento são uma fonte extremamente valiosa de informações, sendo necessário, porém, a interpretação e aplicação adequada.

O desenvolvimento deste trabalho baseia-se principalmente em criar uma ferramenta de fácil implementação operacional, com configuração e manutenção simplificada e sem elevados custos computacionais envolvidos no processamento. Por isso opta-se, a princípio, pela utilização de apenas uma câmera fixa em detrimento de um sistema estereoscópico.

Os resultados aqui apresentados indicam que utilizando uma configuração simples e prática pode-se determinar os parâmetros de período e direção de ondas regulares bimodais. Nesta fase de desenvolvimento do trabalho a avaliação qualitativa dos resultados tem importância predominante em detrimento de análises estatísticas e quantitativas da acurácia da técnica. Neste sentido, os resultados são extremamente promissores, indicando um caminho de grande potencial a ser seguido, a fim de se consolidar a criação de um instrumento óptico operacional de medição dos principais parâmetros de onda.

Os casos analisados permitem concluir que é possível identificar com precisão o período das duas

componentes de onda em situações bimodais a partir da análise espectral das séries temporais de *brilho*. Com exceção de um caso, onde a reflexão lateral de uma das componentes de onda impediu um controle preciso do experimento, todos os demais casos tiveram os períodos determinados com precisão.

Ou seja, a oscilação do *brilho* em pontos fixos na imagem possui uma clara assinatura da passagem da onda. É importante desenvolver uma seleção cada vez mais restritiva em relação aos picos espectrais espúrios causados, provavelmente, por fontes de iluminação secundária, a fim de identificar quais estão relacionados à onda e os que não interessam para a análise.

A determinação da direção de propagação das componentes de onda a partir das diferenças de fase em *arrays* lineares de pixels mostra-se uma ferramenta com grande potencial. Mais do que obter os valores direcionais exatos para cada componente, ressalta-se a sensibilidade desta técnica em diferenciar de forma coerente cada uma das direções de onda envolvida.

O *brilho* na imagem apresenta características que permitem identificar as cristas das ondas e as suas respectivas direções de propagação. Porém, foi observada a limitação da técnica para determinação de ondas com pequena esbeltez, o que causa um contraste insuficiente na imagem óptica. Além disso, é importante destacar que apenas uma pequena região da imagem foi utilizada para a aplicação do processamento direcional. A utilização de mais regiões da imagem, assim como de um maior número de pontos, pode melhorar a acurácia estatística e, possivelmente, permitir a identificação de ondas menos esbeltas.

Ressalta-se que a iluminação local não era ideal, composta por diversas fileiras de lâmpadas com a formação de reflexos pontuais intensos e uma distribuição espacial heterogênea de luz na superfície da água. Isto confirma que o método proposto não requer uma configuração complexa do sistema de imageamento e de condições restritas de iluminação. A abordagem baseia-se principalmente na adoção de uma metodologia de aquisição e processamento simplificada. Estes fatores são importantes na viabilização de uma possível implementação operacional.

Na atual fase do projeto já é possível identificar a direção de propagação e o período de ondas regulares em mares cruzados. Como futura implementação, trabalhamos em obter estes

parâmetros para mares multimodais irregulares, com a análise de outras simulações realizadas no tanque, não apresentadas aqui.

A capacidade de combinar as informações direcionais aqui propostas com técnicas para medição do espectro de variância da superfície do mar (e portanto possibilitando a determinação do espectro direcional) abre um grande leque de possibilidades. Sensores resistivos, capacitivos e de pressão ou mesmo boias não direcionais são, comparativamente, equipamentos muito mais baratos do que boias direcionais.

5 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.; Fedele, F.; Gallego, G., et al. 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.
- Burdic, W. 1984. *EUA: Underwater Acoustic System Analysis*. 1ª ed. New Jersey, Prentice Hall, Englewood Cliffs. 438 p.
- 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.
- Cox, C. 1958. Measurements of Slopes of High-Frequency Wind Waves. *Journal of Marine Research*, 16(3): 199-225.
- Gibson, J.J. 1950. *EUA: The Perception of The Visual World*. Boston, Houghton Mifflin. 235 p.
- 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. *Alemanha: Spatio-Temporal Image Processing – Theory and Scientific Applications*. 1 ed. Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag. 208 p.
- Jähne, B. & Riemer, K.S. 1990. Two-Dimensional Wave Number Spectra of Small- Scale Water Surface Waves. *Journal of Geophysical Research*, 95(C7): 531-546.
- Kohlschütter, E. 1906. Die Forschungsreise S.M.S. Planet, Band2. Stereophotogrammetrische Aufnahmen. *Ann. Hydrographie*, 34, 219 p.
- Laas, W. 1905. Photographische Messung der Meeresswellen. *Zeitschrift des Vereins Deutscher Inge-*

- nieure*, 49:1889, 1937, 1976.
- Mironov, A.S.; Yurovskaya, M.V.; Dulov, V.A. *et al.* 2012. Statistical Characterization of Short Wind Waves from Stereo Images of the Sea Surface. *Journal of Geophysical Research*, v. 117, C00J35, doi: 10.1029/2011JC007860.
- Monaldo, F.M. & Kasevich, R.S. 1981. Daylight Imagery of Ocean Surface Waves for Wave Spectra. *Journal of Physical Oceanography*, 11: 271-283.
- Rapizo, H. 2013. *Brasil: Identificação de Período e Direção de Propagação de Ondas Superficiais de Gravidade Através da Análise de Sequências de Imagens Ópticas*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval e Oceânica, COPPE, UFRJ. Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado, 111 p.
- Santel, F.; Linder, W. & Heipke, C. 2004. Stereoscopic 3D-Image Analysis of Sea Surface. *In: ISPRS COMMISSION V SYMPOSIUM, Istanbul, July, Proceedings*, p. 708-712.
- 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.
- Stilwell, D. Jr. & Pilon, R.O. 1977. Directional Spectra of Surface Waves From Photographs. *Journal of Geophysical Research*, 79(9): 1277-1284.
- Wanek, J.M. & Wu, C.H. 2006. Automated Trinocular Stereo Imaging System for Three-dimensional Surface Wave Measurements. *Ocean Engineering*, 33: 723-747.