



## EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS DE ONDAS SUPERFICIAIS AQUÁTICAS EMPREGANDO PROCESSAMENTO DE IMAGENS ÓPTICAS

Bruno José Paixão da Fonseca

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador(es): Nelson Violante de Carvalho

Rio de Janeiro

Outubro de 2017

EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS DE ONDAS SUPERFICIAIS AQUÁTICAS  
EMPREGANDO PROCESSAMENTO DE IMAGENS ÓPTICAS

Bruno José Paixão da Fonseca

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

---

Prof. Nelson Violante de Carvalho, Ph.D.

---

Prof. Ricardo Fabbri, Ph.D.

---

Prof. Luiz Mariano Paes de Carvalho Filho, Ph.D.

---

Prof. Alessandro Mendonça Filippo, D.Sc.

---

Prof. Wilton Zumpichiatti Arruda, Ph. D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2017

Fonseca, Bruno José Paixão da

Extração de Parâmetros de Ondas Superficiais Aquáticas Empregando Processamento de Imagens Ópticas. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XI, 77 p.: il; 29,7 cm.

Orientador: Nelson Violante de Carvalho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 71-75.

1.Processamento de Imagens. 2. Parâmetros da Onda.  
3. Altura da onda. I. Carvalho, Nelson Violante de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

# Agradecimentos

Agradeço imensamente ao Professor Nelson Violante pelas orientações e conversas prestimosas sobre o desenvolvimento desse projeto.

Meus agradecimentos também aos principais colaboradores na realização deste trabalho. Ao grande Professor Victor D'Ávila, por facilitar meu acesso ao conhecimento em sua própria casa, tornando possível a execução deste trabalho de maneira branda e mais leve com suas boas conversas. Aos Mestres Victor D'Ávila, Uggo Pinho e Henrique Rapizo, sem estes o presente trabalho não seria iniciado, pois mostraram-se sempre solícitos sobre o projeto e seu desenvolvimento. A vontade e o interesse, tanto do Victor como do Uggo, foram a minha maior motivação e incentivo para a execução do presente projeto, transformando um projeto a princípio acadêmico em um projeto pessoal. Muito obrigado pelos ensinamentos no trabalho e na vida e espero que ainda possamos desenvolver muitos outros projetos juntos, sejam eles acadêmicos e pessoais.

A minha família pelo carinho, e minha gratidão, especialmente, as minhas tias, Juci e Leila, e ao meu pai, Antônio, as minhas mãe e avó (*in memoriam*) por sempre me apoiarem em tudo. Sem vocês eu não teria chegado até aqui.

Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS DE ONDAS SUPERFICIAIS AQUÁTICAS EMPREGANDO PROCESSAMENTO DE IMAGENS ÓPTICAS

Bruno José Paixão da Fonseca

Outubro/2017

Orientador: Nelson Violante de Carvalho

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho desenvolve um modelo capaz de estimar o período e a altura de ondas regulares, representado pelo processamento digital de sequências de imagens. O brilho da imagem é a principal base para este estudo. O uso fundamental desta ferramenta visa a diminuição dos custos com equipamentos, pois utiliza apenas duas câmeras. Estas foram utilizadas no experimento do tanque de ondas no LabOceano que pertence à COOPE. Os experimentos constituem na geração de ondas monocromáticas com período e alturas variáveis. No geral, o modelo implementado obteve valores satisfatórios com os parâmetros de ondas.

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

EXTRACTION OF AQUATIC SURFACE WAVES PARAMETERS EMPLOYING  
OPTICAL IMAGE PROCESSING

Bruno José Paixão da Fonseca

October/2017

Advisor: Nelson Violante de Carvalho

Department: Oceanic Engineering

This work develops a model capable of estimating the period and height of regular waves, represented by the digital processing of sequences of images. The brightness of the image is a major factor in the present study. One of the main motivations is to come up with a low cost method to measure waves, since this two cameras. The two cameras were used in a wave tank experiment at labOceano from COOPE UFRJ. The experiments consist on the generation of monochromatic waves with variable period and heights. In general, the implemented model obtained satisfactory values for the wave parameters.

# Sumário

CAPÍTULO 1.....	1
Introdução.....	1
1.1 Revisão Bibliografica sobre os trabalhos mais importantes a respeito do tema .....	3
Abordagem sobre o problema.....	3
1.1.1 A formação e a geometria da imagem.....	3
1.1.2 Modelo de câmera ideal e perspectiva de projeção.....	7
1.1.3 Câmera com parâmetros intrínsecos.....	10
1.2 Determinações do brilho, sistemas de cores RGB e XYZ.....	12
1.3 Determinações do brilho nas imagens digitais na função de cores.....	17
1.4 Técnicas de processamento de imagem para Medições de Ondas.....	22
1.4.1 <i>Shape From Shading</i> (Sombreamento) .....	22
1.4.2 <i>Shape-From-Reflection</i> (Reflexão) .....	24
1.4.3 <i>Shape From Refraction</i> (Refração) .....	29
1.4.4. Estereoscópica.....	32
1.5.1 Parâmetros da onda adotados.....	38
1.6 Objetivo e motivação.....	42
CAPÍTULO 2.....	42
Metodologia.....	42
2.2 Configuração e aquisição das filmagens.....	45
2.3 Processamento das imagens.....	47
2.4 Determinação da Altura da Crista da Onda.....	49
2.3 Períodos da Onda.....	50
CAPÍTULO 4.....	51
Experimento no tanque oceânico (LabOceano) – Ondas reais.....	51
3.1 Introdução.....	51
3.2 Materiais e métodos.....	51
3.3 Processamento com as imagens.....	55
CAPÍTULO 5.....	56
Resultados e Discussão.....	56
4.1 Altura da onda.....	56
Sabendo que o comprimento de onda ( $L$ ) e a altura ( $H$ ) apresentam a razão conhecida como esbeltez ( <i>steepness da onda</i> ), obter-se- á: .....	59
4.2 Análise Espectral do Brilho.....	61
CAPITULO 5.....	67

Conclusão.....	67
5.2 Considerações Finais .....	68
5.3 Futuros Trabalhos .....	70
Referências Bibliográficas.....	71
APÊNDICE.....	76
VERIFICAÇÃO DOS PARAMETROS DO LOCAL E RECONSTRUÇÃO DA IMAGEM. .....	76



# Lista de Figuras

Figura 1: Coordenadas da Imagem da Câmera $S_i = (X, Y, Z)$ e Coordenadas Reais $S_r = (x, y, z)$ . Adaptado de JÄHNE (1993). .....	5
Figura 2: Modelo da Câmera do tipo pin-hole. Fonte Benetazo et al. (2006) .....	8
Figura 3: Relação entre o ponto focal da câmera [ $X_c', Y_c', Z_c'$ ], com o sistema de coordenadas da câmera (pixel da câmera) [ $X'_0, Y'_0, Z'_0$ ] e o sistema de coordenadas reais [ $X', Y', Z'$ ] (BENETAZZO, 2006). .....	9
Figura 4: Transição do sistema de coordenadas reais para o sistema de uma imagem digital (BENETAZZO, 2006). .....	12
Figura 5: Paralelepípedo de cores limitado pelos três vetores das cores primárias: vermelho (red), verde (green) e azul (blue). Fonte de (GOMES, 2013). .....	13
Figura 6: Diagrama de cromaticidade do espectro nas coordenadas x e y. Fonte Jähne et al.(1993).....	16
Figura 7: Diagrama de cromaticidade rg. O novo sistema XYZ definido pela CIE 1931 forma um triângulo que abrange o sistema RGB. Fonte Fairman et al. (1996).....	17
Figura 8: Resultado do espectro relativo do ponto de visão humano sobre condições padrões da iluminação (CIE). A linha pontilhada corresponde à baixa irradiância e a linha não pontilhada é a alta irradiância de uma iluminação ideal, Fonte de Jähne et al. (1994).....	18
Figura 9: Imagem do oceano real (à esquerda) com as diferentes representações das técnicas de determinação do brilho. a) Luminância; b) Luma; c) Intensidade Luminosa; d) Value (HSV ou HSB); e) Bright (BCH). Fonte de Gomes, (2013).....	21
Figura 10: Desenho esquemático da técnica de reflexão sobre uma imagem de inclinação em relação à onda. Fonte (JÄHNE et. al, 1994).....	25
Figura 11: Linhas de contorno da irradiância para inclinações de onda entre -0.5 a 0.5 para as duas componentes, a partir da técnica baseada nos princípios de reflexão. Fonte Jähne, (1993). .....	28
Figura 12: Desenho ilustrativo da configuração do sistema de medição de inclinação da superfície, baseado no sistema de refração para uma câmera configurada a acima da superfície da água e a fonte abaixo da água. Adaptado de Jähne, et al, (1993). .....	30
Figura 13: Esquema utilizando duas câmeras para sobreposição de imagem. ....	33
Figura 14: Desenho ilustrativo da geometria básica da estereofotografia. WEILL et al. (2005).....	34
Figura 15: configuração estereoscópica para eixos ópticos das câmeras paralelos. Jähne, (1993).....	35
Figura 16: Análise da estereoscópica de um par de imagens para obtenção do espectro do número de ondas: a) aquisição de duas imagens simultâneas com câmeras diferentes; b) obtenção da distribuição espacial das elevações da superfície; c) gráfico do espectro de número-de-onda. Benetazzo, 2006. ....	40
Figura 17: programa ondômetro óptico realizando processamento das imagens. ....	44
Figura 18: diagrama dos passos de processamento que estão sendo realizados no trabalho. ....	45

Figura 19: desenho esquemático da obtenção da altura da crista da onda através da semelhança de Triângulo. Obs: CCD1 e CCD 2 são as orientações da câmera; b é um ponto qualquer de intersecção do pixel; CI: câmera inferior; e CS: câmera superior. O b é o zero da marcação da régua e o B é o valor 200 na régua.....	48
Figura 20: Descrição de larguras e comprimento do tanque oceânico (LabOceano).....	52
Figura 21: Fotografia do tanque oceânico (LabOceano).....	53
Figura 22: Distribuição dos waves probes ao longo do Tanque.....	53
Figura 23: Imagem da posição das câmeras (LabOceano). ....	54
Figura 24: Imagem processada pelo Ondômetro Óptico (Câmera Superior). ....	55
Figura 25: Imagem processada pelo Ondômetro Óptico (Câmera Inferior).....	56
Figura 26: Figura processada pelo programa (Câmera superior), com pontos fixos de extração dos dados em vermelho.....	57
Figura 27: Figura processada pelo programa ondômetro óptico (câmera inferior) com pontos fixos de extração dos dados em vermelho .....	58
Figura 28: figura sobre a esbeltez da onda. Fonte: <a href="http://www2.igc.usp.br/sedimentologia/arq/AulaSedI-Fluxo%209%20de%20junho.pdf">http://www2.igc.usp.br/sedimentologia/arq/AulaSedI-Fluxo%209%20de%20junho.pdf</a> .....	59
Figura 29: São seis pontos fixos no tanque oceânico a fim de extrair os dados de períodos .....	61
Figura 30: Análise espectral de todas as componentes do espectro do brilho, ms (millesimo de segundos) x Hz (Hertz).....	62
Figura 31: Gráficos contendo os valores do espectro do brilho (seis pontos) no frame da imagem analisada .....	63
Figura 32: Imagem demonstrando ponto de reflexo sobre a onda no tanque.....	64
Figura 33: Análise espectral de cada ponto com período de 0.7 segundos. ....	64
Figura 34:Espectro total resultante da média dos 75 espectros obtidos para o caso 2 - período de onda T de 0.7 segundo. $T_p = 0.66$ segundos. ....	65
Figura 35: Filmagem da câmera lateral no LabOceano.....	76

# Lista de Tabelas

Tabela 1: Descrição da posição das câmeras no LabOceano. ....	54
Tabela 2: As colunas representam respectivamente: os diferentes casos gerados; a configuração de altura e período programadas no tanque oceânico; os valores de altura sacadas pelo processamento; e o valor da esbeltez das ondas geradas no batedor.....	60
Tabela 3: Valores de ondas gerados no tanque e pelo Ondômetro Óptico; $T_s$ é o período para câmera superior e $T_i$ é o período para câmera inferior. ....	66

# CAPÍTULO 1

## Introdução

Primeiramente, é importante conhecer os processos marinhos e costeiros que são essenciais para o planejamento de um projeto de engenharia em geral. Por meio do avanço da tecnologia e acurácia nas medições, existem inúmeros equipamentos capazes de aferir dados meteo-oceanográficos importantes nos estudos relacionados aos fenômenos físicos dos oceanos e seu comportamento.

Para estudar o seu comportamento e os fenômenos físicos (parâmetros do mar), um dos mais importantes é o conhecimento das ondas, tanto para área de *surf* como para obras de engenharias em relação ao planejamento de construção ou estruturas de portos.

Com o avanço tecnológico dos vídeos e da computação, tanto em computadores de uso pessoal como estações automatizadas de trabalho, têm-se cada vez mais poder de processamento suficiente para processar os dados de imagens. Como resultado, softwares multimídias e hardwares tornam-se a base da manipulação de imagens, sequência de imagens (vídeos) e, inclusive, visualizações tridimensionais.

Juntamente com esses avanços tecnológicos, o favorecimento da análise dos parâmetros de ondas através de fotografia é de grande importância a fim de obter uma ferramenta fácil e rápida para aquisição dos dados de ondas.

Com o avanço tecnológico e juntamente o emprego de técnicas de processamento de imagens, foi gerado o projeto do ondômetro óptico se iniciou a partir de estudos através de Gomes, *et al.* 2014. Assim, este projeto foi desenvolvido por meio de uma única câmera e, de onde, posteriormente, dados de direção e período da onda foram extraídos.

Segundo Gomes *et al.*, (2015), a utilização de uma nova técnica para obtenção dos parâmetros da onda, como o período e direção de propagação de ondas superficiais de gravidade, é baseada no processamento digital das sequências de imagens (padrões espaço temporal devido ao brilho), no qual se utilizou apenas uma câmera a fim da aquisição direta dos resultados.

Com a próxima etapa e continuação do projeto, a obtenção de altura da onda se deu por meio de duas câmeras frontais ao trem de cristas de onda, possibilitando, assim, a aquisição de resultados através dos *frames*.

O experimento do LabOceano é uma etapa fundamental no desenvolvimento e implementação dessa ferramenta inovadora para mensuração da altura da onda, sendo desnecessário a utilização de equipamentos com alto custo de medição, bastando apenas duas câmeras de baixo custo. A interpretação e compreensão desse novo método são de suma importância, tendo sido esses dados adquiridos em função das condições de iluminação local e temporal do brilho para delimitação do período e da altura da onda.

Os resultados analisados permitem concluir que é possível identificar com precisão o período e a altura das ondas, porém tão somente com o emprego de duas câmeras perpendiculares às ondas.

Cabe salientar que para futuras pesquisas, é indispensável trabalhar com câmeras laterais às ondas, possibilitando a análise precisa do período, altura das ondas e até direção das ondas. A utilização de uma nova técnica para a obtenção dos parâmetros da onda, como o período e direção de propagação de ondas superficiais de gravidade, está baseada no processamento digital das sequências de imagens (padrões espaço temporal devido ao brilho).

Muito embora o trabalho tenha sido desenvolvido com ondas uni-modais e regulares, é de interesse prosseguir com a pesquisa, trabalhando com ondas bimodais irregulares e até mesmo com uso de dados do oceano real.

Conforme visto em diversos trabalhos anteriores, o estudo de parâmetros das ondas por meio da interpretação de imagens é primordial, pois é uma solução rápida, não necessitando de equipamentos caros. Dessa forma, torna-se extremamente vantajoso investir nessa nova linha de pesquisa.

É de extrema importância o conhecimento das ondas, tanto para área de *surf* como para futuras engenharias em relação ao planejamento de construção ou estruturas de portos.

Cabe informar que, neste trabalho, continua-se uma linha de pesquisa iniciada anteriormente, porém utilizou-se um software capaz de estimar a altura da onda (unimodais) por meio de duas câmeras na mesma posição, contudo, com alturas diferentes.

## **1.1 Revisão Bibliográfica sobre os trabalhos mais importantes a respeito do tema**

### **Abordagem sobre o problema**

Nesse capítulo, abordar-se-á a teoria sobre os diferentes tipos de métodos utilizados para a análise de processamento de ondas, tanto em relação a período, quanto à direção e altura de ondas. Toda a análise basear-se-á no conceito de processamento de imagens digitais, tendo como parâmetro fundamental o brilho, sendo este o cerne para o estudo específico no tocante ao período de onda.

Alguns conceitos serão apresentados das imagens digitais, os quais serão os fundamentos das principais técnicas ópticas de medição, tais como: vantagens e limitações dos métodos.

Outrossim, há muitos conceitos em relação à técnica para medição dos parâmetros de ondas, que serão abordados no decorrer do trabalho.

#### **1.1.1 A formação e a geometria da imagem**

Desde as civilizações antigas, as formas rudimentares de entendimento da geometria da formação da imagem, incluindo vários modelos de projeção do mundo 3-D em um plano, são implícitas de diversas maneiras nas artes visuais. No entanto, as raízes da formalização da geometria de constituição da imagem, em um modelo matemático, remontam ao trabalho da Geometria Euclidiana, no século 6 a.C.

Cabe informar que a geometria, entretanto, é apenas uma parte do processo de formação da imagem, sendo que, na geração de uma imagem, se decide não apenas onde desenhar, mas também com que cor ou valor de cinza aplicar a um local particular na imagem. A interação da luz com a matéria está na base dos estudos de Leonardo Da Vinci, em 1500, e seus ensaios sobre perspectiva, sombreamento, cor e até estereoscópica, que são de fundamental importância no desenvolvimento do conhecimento de imagens.

Nesse contexto, em uma cena já processada, é importante a análise do campo visualizado, onde se deve compreender um objeto como ponto de referência da intensidade da luminosidade em pixel na imagem.

Também os fotossensores digitais, conhecidos como o CCD (*Couple Charge Device*) fornecem uma geometria mais estável da captação da luz. Desta forma, a geometria óptica permite referenciar um ponto encontrado na imagem em função das coordenadas reais. Para o melhor entendimento neste assunto, será abordada no próximo item a relação das coordenadas reais em função das coordenadas da imagem.

Nota-se que a formação de imagens consiste essencialmente na geometria óptica. A geometria óptica mostra onde se encontra um ponto do mundo no plano de imagem. De outro lado, a medição de imagens apresenta grande importância, com o rápido progresso na tecnologia de sensores de imagem. Os sensores de fotos são bastante modernos, como os dispositivos de carga acoplada (CCD), que fornecem uma geometria estável para uma grande precisão.

### **1.1.1.2 Coordenadas da Câmera (imagem em pixel) para Coordenadas Reais.**

Para melhor compreensão, as coordenadas da imagem com as coordenadas reais da imagem, segundo a (*Figura 1*), denominar-se-á a primeira coordenada de  $S_r = (X, Y, Z)^T$  e a segunda coordenada  $S_i = (x, y, z)^T$ , vale ressaltar que T é transposta. Segundo JAHNE (1993), as coordenadas (X,Y e x, y) são chamadas de coordenadas horizontais, sendo a terceira coordenada real Z, está alinhada com o eixo óptico da câmera (*Figura 1*).

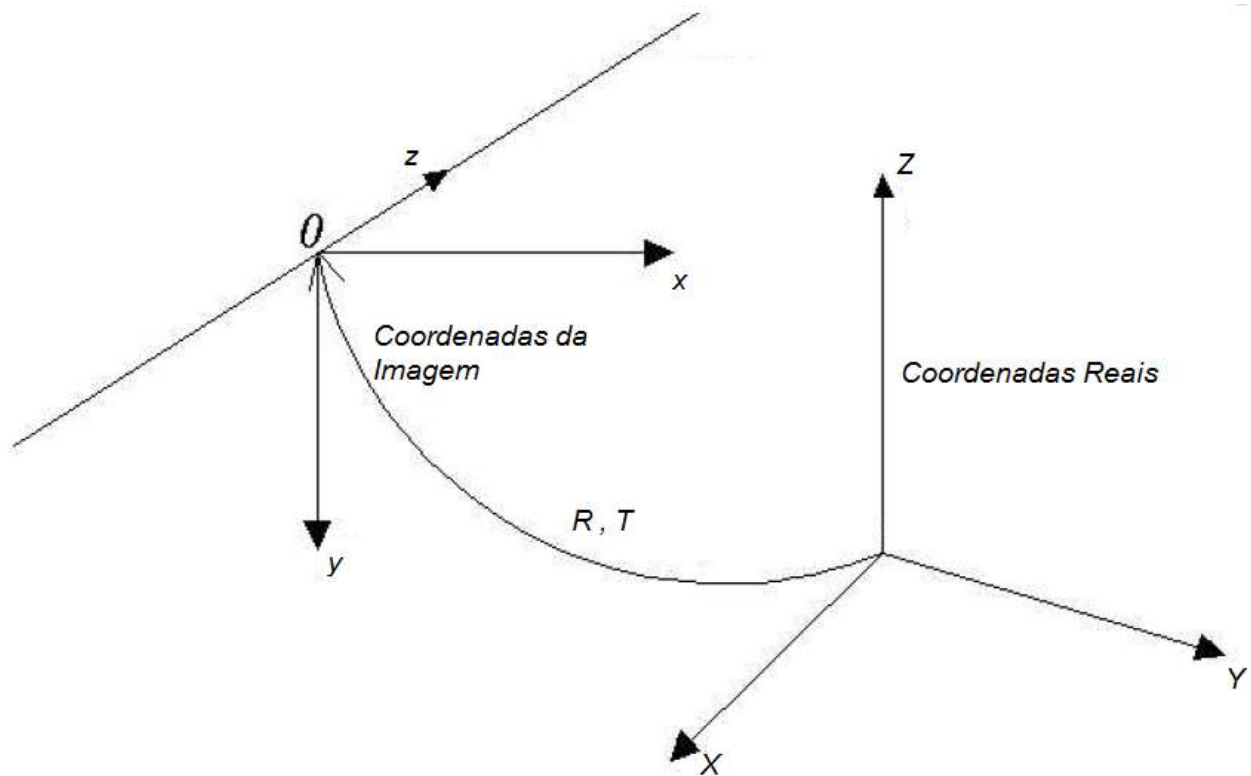


Figura 1: Coordenadas da Imagem da Câmera  $S_i = (x, y, z)$  e Coordenadas Reais  $S_r = (X, Y, Z)$ .  
Fonte de JÄHNE (1993).

As posições das coordenadas reais para as coordenadas da imagem podem ser descritas de duas maneiras diferentes, quais sejam: através de um termo de rotação e o outro de translação (*Figura 1*). Os termos de transição da coordenada real para a coordenada da câmera são descritos pelo termo de rotação. Primeiro, muda-se a origem da coordenada real do sistema para as coordenadas da câmera pelo vetor de translação  $T$  (*Figura 1*). Em seguida, modifica-se a orientação do sistema deslocado por rotações sobre os eixos óptico, adequados para que coincida com o sistema de coordenadas da câmera. Na expressão matemática, pode ser descrita por subtração, que é o vetor de translação  $T$ , e pela multiplicação do vetor de coordenadas da matriz de rotação  $R$ .

$$S_i = R(S_r - T) \quad (1)$$

Os elementos da rotação  $R$  de uma matriz são compostos por 3 (três) conjuntos de elementos de rotações em relação aos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , cada um com seu ângulo, chamado de ângulos Eulerianos de Rotação (JÄHNE, 1993), que de uma maneira útil, revelam-se bastante complexos e não lineares.



Daí diz-se que um conjunto amplamente utilizado de parâmetros são os três ângulos de rotação Euleriana. Qualquer rotação pode ser decomposta em três rotações consecutivas sobre os eixos do sistema de coordenadas com esses ângulos (GOLDSTEIN, 1980). Rotação e translação se constituem de seis parâmetros independentes que descrevem a transição geral das coordenadas reais para as coordenadas da câmera ou sistemas de imagem das câmeras (JÁHNE, 1993).

Em outras palavras, como a multiplicação de matrizes é associativa, pode-se ver a matriz  $M$  como composta de várias matrizes de transformação, executando tais transformações elementares, como translação, rotação ao redor do eixo de coordenadas e projeção de perspectiva.

Na equação 2, é demonstrada a matriz das coordenadas homogêneas de um vetor de coluna de quatro componentes  $X = (x, y, z, t)^T$ , a partir da qual as coordenadas tridimensionais comuns são obtidas dividindo-se os três primeiros componentes homogêneos (Foley et al., 1990). As matrizes de transformação para as transformações elementares são:

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\text{sen}\alpha & 0 \\ 0 & \text{sen}\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Rotação em torno do eixo x} \quad (2)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \text{sen}\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\text{sen}\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Rotação em torno do eixo y}$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\text{sen}\varphi & 0 & 0 \\ \text{sen}\varphi & \cos\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ Rotação em torno do eixo z}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_1 \\ 0 & 1 & 0 & T_2 \\ 0 & 0 & 1 & T_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Translação das coordenadas } (T_1, T_2, T_3)^T$$

É utilizado um sistema de coordenadas direitas, as quais são positivas e definidas como eixo positivo devido a sua rotação. O  $\alpha$  é o ângulo de rotação em torno do eixo  $x$ ,  $\theta$  é o ângulo de rotação em torno do eixo  $y$  e  $\varphi$  em torno do eixo  $z$ .

A forma matricial utilizada para representar as coordenadas da câmera para as coordenadas reais é a seguinte:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ou na forma:

$$S = g_{ri}(S_0) \quad (4)$$

onde  $g_{ri} = (R_{ri}, T_{ri})$  é representado os termos de rotação e translação e os índices  $ri$  que é a transição do sistema de coordenadas reais para o sistema da imagem.

### 1.1.2 Modelo de câmera ideal e perspectiva de projeção

Basicamente, o modelo de câmera ideal é o sistema *pin hole* (Figura 2), consistente em uma maneira de ver uma imagem real através de uma câmara escura. Por meio de um pequeno orifício, a luz é captada para o interior da câmera e sofre um movimento de inversão, onde a imagem é projetada. Para produzir uma imagem razoavelmente nítida,

a abertura da câmara tem que apresentar um furo pequeno, de aproximadamente 0,5 mm ou menos JÄHNE (1993) e BENETAZZO (2006).

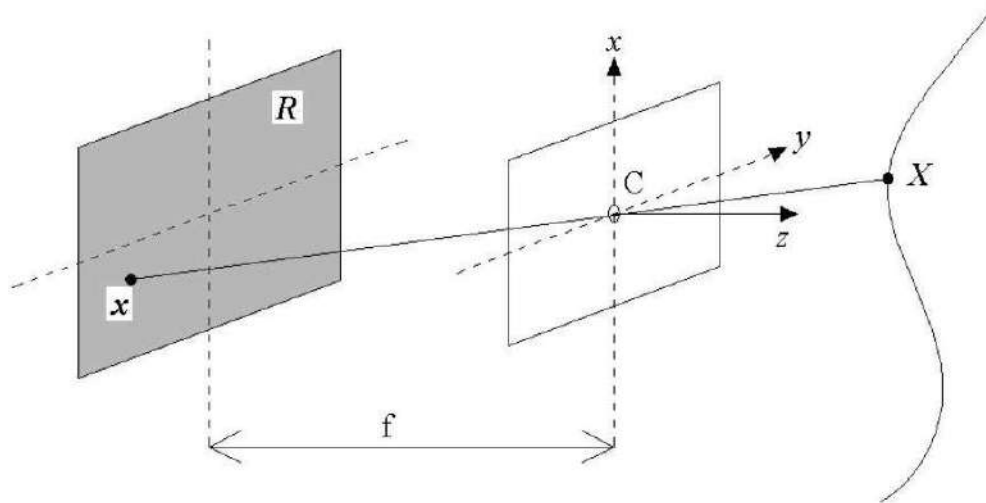


Figura 2: Modelo da Câmera do tipo *pin-hole*. Fonte Benetazo *et al.* (2006).

Os sistemas de coordenadas estão relacionados entre si (*Figura 2*). A primeira coordenada do sistema é fixa à câmera, onde é observada a cena. As coordenadas são denotadas como  $X = [X, Y, Z]^T$ , onde o eixo Z coincide com a linha de visão da câmera, e os eixos X e Y são paralelos aos eixos do CCD. O sistema de coordenadas em 3D do ponto focal é  $X_0 = [X_0, Y_0, Z_0]^T$ , que são coordenadas espaciais de um ponto; o segundo sistema de coordenadas define o sistema 2D (coordenadas da imagem em pixel) que é  $J_0 = [j_0, i_0]^T$ , também do mesmo ponto (BENETAZZO, 2006).

Segundo Benetazo (2003), um feixe de luz em  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , que são coordenadas reais, passa pelo centro  $C$  e encontra o plano da imagem em  $(x, y, -f)$ , onde  $f$  é a distância focal da lente. O eixo óptico passa pelo centro  $C$ , que é ortogonal ao plano  $R$ . Por fim, correlaciona-se as coordenadas reais  $(X, Y, Z)$  com as coordenadas da imagem  $(x, y)$ :

$$x = -\frac{fX}{Z} \quad , \quad y = -\frac{fY}{Z} \quad \text{ou} \quad \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = -\frac{f}{Z} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (5)$$

Em duas paralelas da coordenada da imagem real plana, tem o escalar  $f/z$  (Equação 5), um fator de escala das coordenadas reais, que são paralelas ao plano  $R$ , no qual se preserva as coordenadas reais sem a necessidade de inserir alguma informação sobre o

tamanho de um objeto e das distâncias reais da cena mostrada pela câmera. O sinal negativo se infere como se a imagem fosse invertida, fazendo com que a imagem de um objeto pareça estar de cabeça para baixo no plano retinal. Desta maneira, para a eliminação desse efeito, pode-se simplesmente inverter a imagem, ou seja, colocar o plano de imagem em frente ao centro óptico (Figura 2).

Assim, com uma Câmera CCD, a relação entre esses dois sistemas de coordenadas depende da distância focal, do tamanho e da forma dos pixels e da posição do CCD no sistema de câmera para a lente (Figura 3).

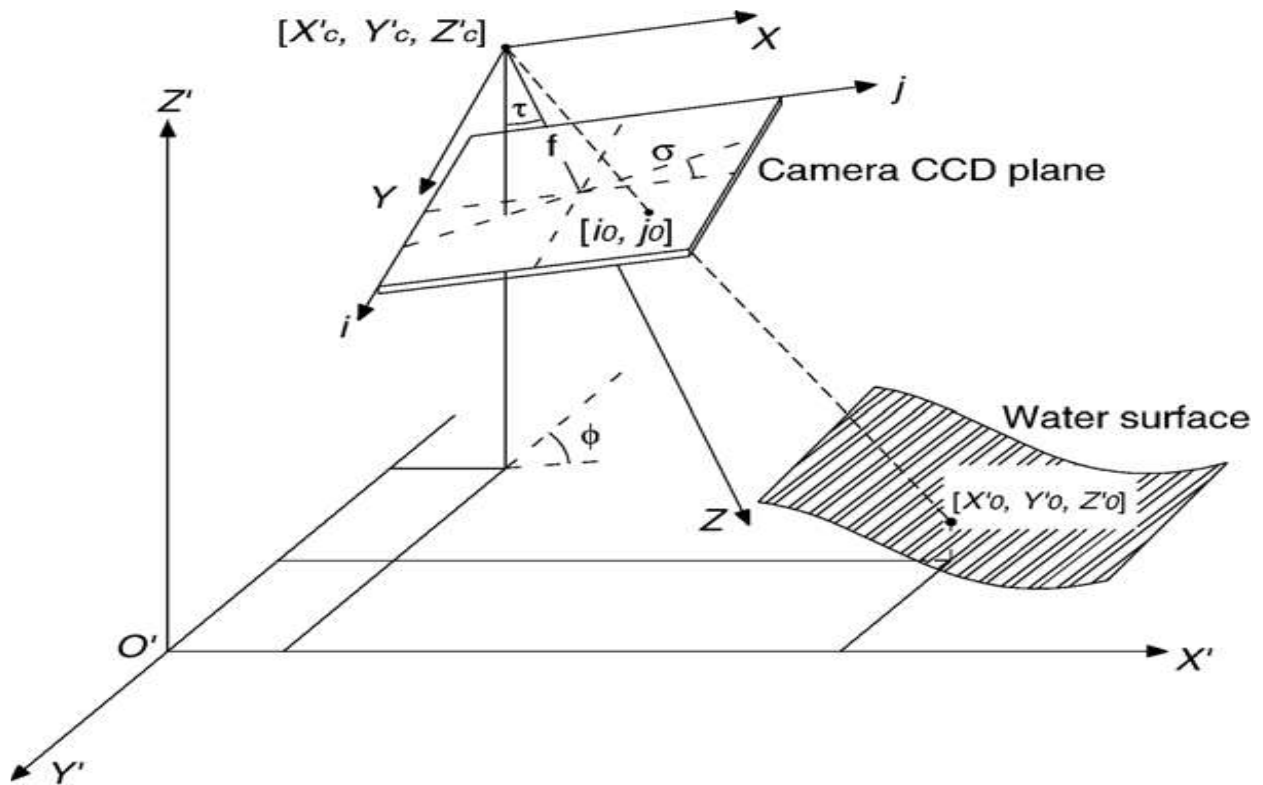


Figura 3: Relação entre o ponto focal da câmera  $[Xc', Yc', Zc']$ , com o sistema de coordenadas da câmera (pixel da câmera)  $[X'o, Y'o, Z'o]$  e o sistema de coordenadas reais  $[X', Y', Z']$  (BENETAZZO, 2006).

Uma linha reta (espaço real) é projetada também em uma linha reta no plano da imagem, onde a sua projeção é representada pela matriz:

$$Z' \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

O  $-f$  é a distância focal medida em largura e altura em pixel. O termo  $Z'$  é um termo escalar positivo, já que a coordenada  $Z$  (profundidade) não é conhecida. A matriz do lado direito da equação é chamada matriz de projeção, que para ficar mais fácil de visualizar é decomposta em duas matrizes:

$$\begin{bmatrix} -f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f & 0 & 0 \\ 0 & -f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

A partir das matrizes com os termos de translação e rotação (eixos do sistema de coordenadas reais), é realizado logo o modelo geométrico para a câmera ideal *pin hole*, que matricialmente é demonstrado por:

$$Z' \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f & 0 & 0 \\ 0 & -f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

ou na forma matricial simplificada:

$$ZS = PAg_{ri}S_0 \quad (9)$$

### 1.1.3 Câmera com parâmetros intrínsecos.

Através das simplificações obtidas pela equação 9, entende-se que não significa que são coordenadas reais da imagem, e nem o eixo óptico está alinhado com o eixo  $Z$  das coordenadas reais. O eixo óptico ou o centro óptico não são conhecidos, nem as unidades de medidas (Ma *et al.*, 2001).

Considera-se  $(X_s, Y_s)$  como duas coordenadas correspondentes ao pixel da imagem digital, e a junção da equação 9 e as coordenadas digital, descrita por uma matriz de escala:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 \\ 0 & s_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (10)$$

Junto a isso, a fim de se convencionar a equação, é necessário utilizar a coordenada da imagem do topo até a base da imagem, com (i, j), tendo o i como linha e j como coluna da matriz da imagem, necessitando, deste modo, transladar a matriz e inverter o eixo, que, após essa transição, o novo sistema de coordenadas se tornará (Ma *et al.*, 2001):

$$\begin{bmatrix} x_{im} \\ y_{im} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_x & 0 & o_x \\ 0 & -s_y & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Na forma  $o = [o_x, o_y, 1]$  é o ponto principal do ponto em que o eixo óptico intersecta o plano retinal  $R$ .

O  $x_{im} = -(x_p - o_x)$  e  $y_{im} = -(y_p - o_y)$  são as coordenadas da imagem em pixels.

Usando a matriz da equação (11) que representa a projeção de perspectiva descrita, tem-se:

$$Z' \begin{bmatrix} x_{im} \\ y_{im} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_x & 0 & o_x \\ 0 & -s_y & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -f & 0 & 0 \\ 0 & -f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}$$

Nesse ínterim, determina-se um modelo geral simplificado, utilizando a projeção de perspectiva juntamente com os termos de translação, rotação e escala de transição para coordenadas em pixels. Para melhor descrever a transição entre o sistema de coordenadas reais  $S_0 = (X_0, Y_0, Z_0)^T$  e as coordenadas de imagem digital, segue a equação abaixo formulada:

$$Z' \begin{bmatrix} x_{im} \\ y_{im} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f s_x & 0 & o_x \\ 0 & f s_y & o_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Na Figura 4, bem se demonstra a transição do plano da imagem (em pixel) para a imagem real. Dado a um ponto nas coordenadas reais, é primeiro transladado por T para após se rotacionado por  $R_x$ ,  $R_y$  e  $R_z$ , e, então, projetado no plano da imagem C.

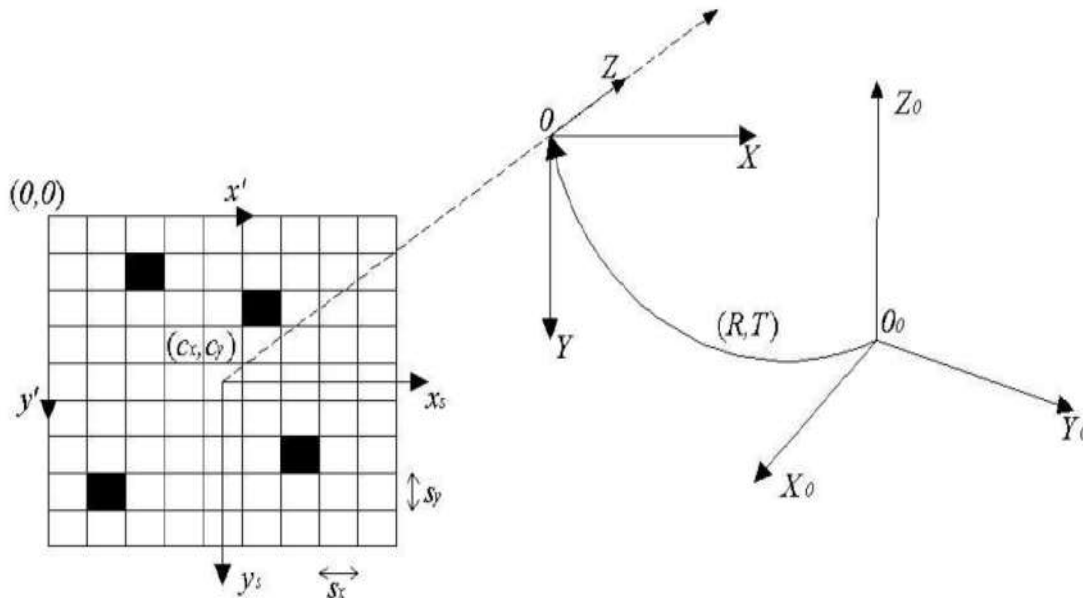


Figura 4: Transição do sistema de coordenadas reais para o sistema de uma imagem digital (BENETAZO, 2006).

## 1.2 Determinações do brilho, sistemas de cores RGB e XYZ.

Primeiramente, para podermos saber a altura da onda, há a necessidade de sabermos a determinação do brilho da imagem, sistema de cores RGB e XYZ que é calculado pelo modelo Ondômetro Óptico. As cores, conforme a visão humana, são sinal contínuo de comprimento de onda de energia eletromagnéticas de radiações. As cores visíveis ao olho humano podem ser interpretadas de várias bandas de frequência, ou seja, o alcance visível fica entre 380 a 780 nm. Entretanto, o sistema de cores usa três tipos de canais até a imagem colorida, são eles: vermelho, verde e azul no espaço de cores RGB. Cabe acrescentar que há diferentes tipos de espaços de cores RGB a depender do tipo de aplicação e especificação técnica que se deseja fazer.

De acordo com o entendimento de Fairman *et al.* (1996), a colorimetria tem como princípio básico as cores visíveis que podem ser formadas a partir da combinação linear de três cores primárias, demonstrado pela equação abaixo:

$$\mathbf{Q} = R\mathbf{R} + G\mathbf{G} + B\mathbf{B} \quad (13)$$

A equação 13, mostra certa quantidade de feixe de luz, formado por três componentes espectrais primárias **R**, **G** e **B**. Com isso, os escalares R, G e B são produtos das componentes primárias correspondentes à equação. Portanto, a quantidade da componente primária na formação da cor é determinada pelo produto desta que são: R **R**, G **G** e B **B**.

Segundo o já citado Gomes (2013), há diversos dispositivos de visualização utilizadores do sistema RGB de cores, no sistema (x, y) da imagem. Nestes dispositivos, em geral, o valor mínimo  $R = G = B = 0$  representa a cor preta, enquanto o valor máximo  $R = G = B = 255$  produzirá a cor branca. Quaisquer cores, onde os valores R, G e B das componentes primárias, são iguais a ( $R = G = B$ ) e produzirão cores na escala de cinza.

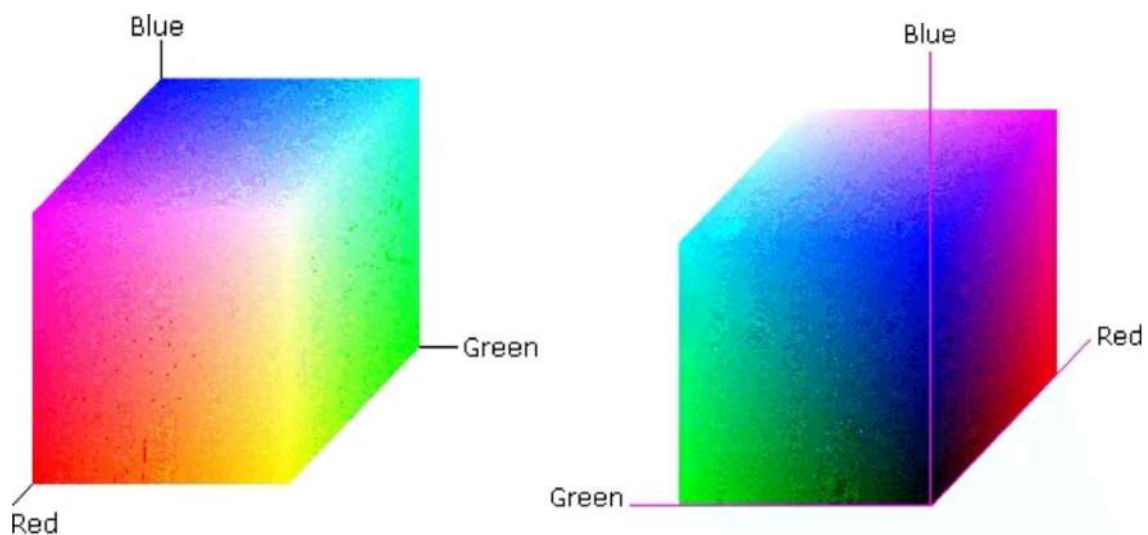


Figura 5: Paralelepípedo de cores limitado pelos três vetores das cores primárias: vermelho (red), verde (green) e azul (blue). Fonte de (GOMES, 2013).



Na amostragem espectral, a visão humana da cor pode ser considerada como uma mistura de amostragens de bandas de frequências (comprimentos de ondas) diferentes. A sensibilidade humana cobre diferentes bandas, com um máximo em 445 nm, 535 nm e 575 nm (JÁHNE, 1993). Com um sensor de 3 cores (Figura 5), é óbvio que os sinais de cores cobrem um espaço 3-D. Cada ponto neste espaço representa uma cor. Várias distribuições espectrais, denominadas estímulos metaméricos de cor, se situam cada um em um ponto deste espaço de cores. Com estes 3 sensores primários de cores, os valores são percebidos em trincas, usualmente denominados triestímulos. Vale dizer que uma das questões mais importantes em colorimétrica é o estabelecimento de um sistema que represente as cores como uma combinação linear de algumas cores básicas ou primárias. Um conjunto com três distribuições espectrais  $\phi(\lambda)$  representa o conjunto de cores primárias e resulta em um *array* de respostas que pode ser descrito pela matriz  $P$  com:

$$p_{i,j} = \int R_i(\lambda)\phi(\lambda)d\lambda \quad (14)$$

Cada vetor  $p_j = (p_{1j}, p_{2j}, p_{3j})$  representa um *tristímulus* da cor primária no espaço de cores 3-D. Obviamente, apenas as cores resultantes da combinação linear destes vetores base  $p_j$  podem ser devidamente representadas neste sistema:

$$s = Rp_1 + Gp_2 + Bp_3 \quad \text{com} \quad 0 \leq R, G, B \leq 1, \quad (15)$$

Os coeficientes são denotados por  $R$ ,  $G$  e  $B$ , indicando as três cores primárias: vermelho (*red*), verde (*green*) e azul (*blue*). Uma possibilidade de sistema primário de cores é formada pelas cores monocromáticas, como, por exemplo, vermelho, verde e azul com comprimentos respectivos de 700 nm, 546.1 nm e 435.8 nm, adotadas pela CIE em 1931, sendo referência de padrão até os dias de hoje. As cores que podem ser representadas por esse sistema estão dentro de um “paralelepípedo” formado pelos três vetores base das cores primárias.

No sistema **XYZ**, pode-se evitar valores negativos de coordenadas de cor, utilizando o artifício de um novo sistema de coordenadas com “cores primárias virtuais”. Este sistema é conhecido como *XYZ* e é construído de tal maneira que aumente a abrangência de cores do sistema e apenas inclui a curva das cores monocromáticas com coeficientes positivos. É dado pela transformação linear das coordenadas:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.490 & 0.310 & 0.200 \\ 0.177 & 0.812 & 0.011 \\ 0.000 & 0.010 & 0.990 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (16)$$

As cores vistas são o sinal contínuo do comprimento de onda de radiações eletromagnéticas. A faixa do visível se situa entre 380 e 780 nm. No entanto, a maioria dos sistemas digitais de exibição de cores usam 3 canais para renderizar a imagem. Estes são: o Vermelho, Verde e Azul (espaço de cores RGB). Existem diferentes espaços de cores RGB dependendo do tipo de aplicação, e tem sido estudada desde que o cálculo do RGB dependia de um dispositivo digital. Ademais, diferentes tipos de espaços de cor têm sido estudados. Toda cor exibida por um dispositivo digital de exibição é representada no espaço de cores RGB, renderizada no sistema xy da imagem e no cubo de cor RGB (Figura 5).

Apesar da maioria dos dispositivos atuais representarem suas cores no espaço RGB, matematicamente, as cores nestes outros espaços de representação podem ser convertidas para RGB, assim como o oposto.

Na consideração total do espectro de cores, valores de triestímulos 3-D são derivados e calculados, formando as coordenadas XYZ de estímulos de cor. A transformação de RGB para XYZ é obtida por um sistema linear de equações representado por:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.489989 & 0.310008 & 0.2 \\ 0.176962 & 0.81240 & 0.010 \\ 0.0 & 0.01 & 0.99 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (17)$$

O sistema de conversão de RGB para XYZ pode ser obtido invertendo a matriz dos coeficientes:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.3647 & -0.89658 & -0.468083 \\ -0.515155 & 1.426409 & -0.088746 \\ -0.005203 & -0.014407 & 1.0092 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (18)$$

**Coordenadas Cromáticas** – As coordenadas cromáticas são usadas para plotar a distribuição de cores e validar o espaço de cores RGB utilizado. As coordenadas cromáticas x, y e z são definidas por:

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{X}{X + Y + Z} \\
 y &= \frac{Y}{X + Y + Z} \\
 z &= \frac{Z}{X + Y + Z}
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

A equação 19 contém os coeficientes de transformação de XYZ para RGB. De fato, identifica-se que  $x + y + z = 1$ . Pode-se representar um diagrama de cromaticidade no plano  $x, y$ , como também excluir  $z$  da representação, pois sabendo os valores de  $x$  e  $y$  se obtém o valor de  $z$  pela igualdade mostrada. No diagrama, todo o interior e os limites da curva representam todos os valores de cromaticidade do espectro visível (Figura 6).

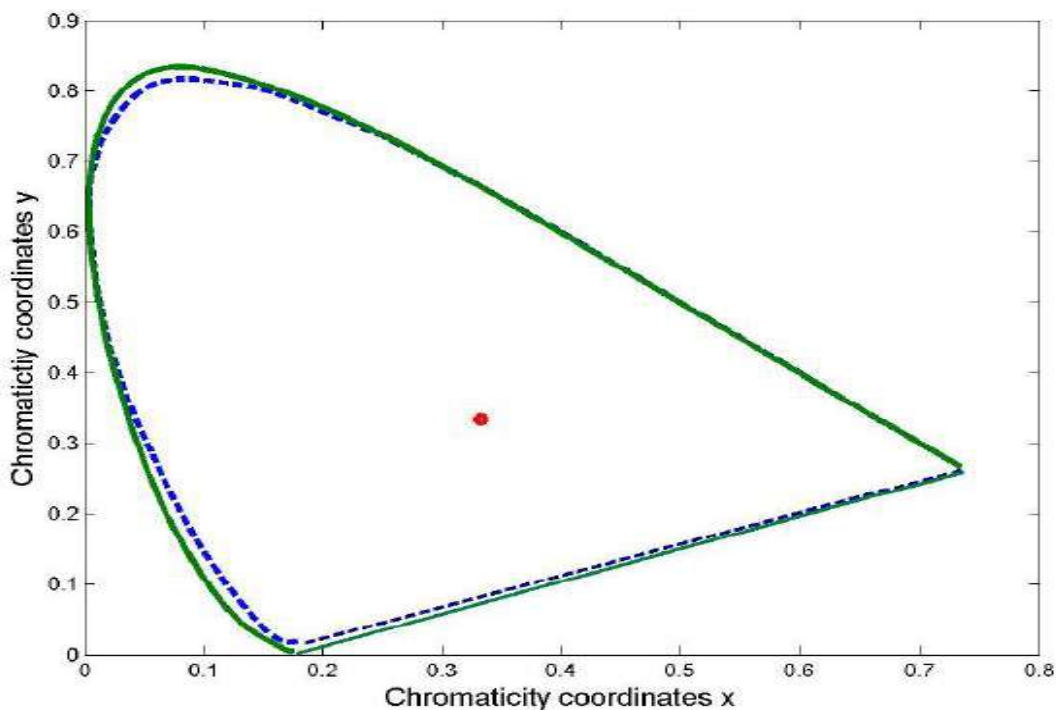


Figura 6: Diagrama de cromaticidade do espectro nas coordenadas  $x$  e  $y$ . Fonte: Jähne *et al.*(1993).

As condições de transformações que levariam a um sistema de valores todos positivos para unir as novas equações primárias no diagrama de cromaticidade do antigo sistema, geraram um limite triangular (RGB) não abrangentes de boa parte do espectro de interesse. Os valores *triestimulos* espectrais têm, ao menos, um valor negativo e, de fato, nenhum sistema de valores reais para as primárias poderem falhar

nesta representação. Com isso, a formulação de princípios, onde os valores devem ser positivos e o mínimo de espaço desperdiçado, poderia ser satisfeita fazendo com que os lados do triângulo se reunissem às 3 primárias do sistema XYZ, que passariam ligeiramente por fora do local espectral de interesse, como mostra a Figura 7.

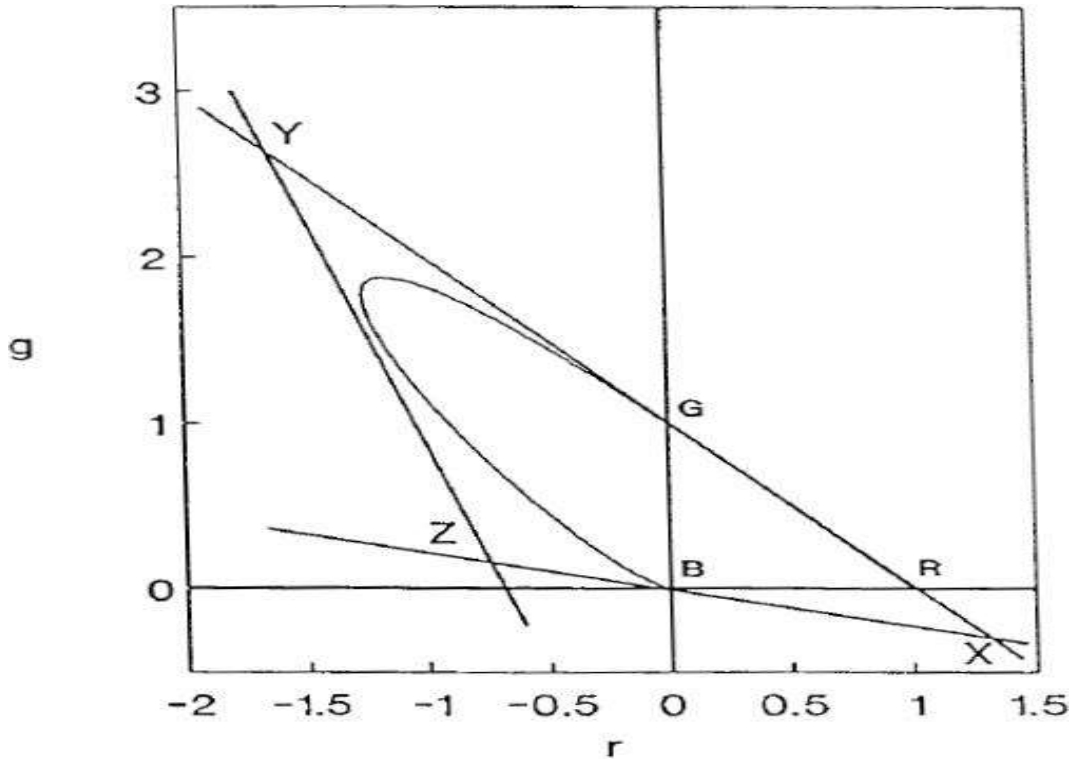


Figura 7: Diagrama de cromaticidade  $rg$ . O novo sistema XYZ definido pela CIE 1931 forma um triângulo que abrange o sistema RGB. Fonte Fairman et al. (1996).

### 1.3 Determinações do brilho nas imagens digitais na função de cores

Segundo o autor Bezryadin (2007), o brilho da imagem permite distinguir a intensidade aparente de emissão de luz, sendo fácil a percepção do feixe de luz. É difícil estimar ou mensurar a resposta espectral da visão humana em forma quantitativa em função do brilho do objeto.

Mesmo com vários estudos aprofundados sobre o brilho, ainda não existe um método ou uma fórmula eficaz para a obter o brilho. Logo, existem inúmeros métodos

com o objetivo do processamento da imagem. A seguir serão apresentados alguns métodos para o cálculo do brilho (BEZRYADIN, 2007):

- **Luminância:** o modelo de luminância foi o mais próximo para obter o brilho, ou seja, é um modelo que fica em função do brilho. O sistema XYZ tem como objetivo reproduzir a componente luminância com uma combinação linear das componentes RGB que reproduzisse a curva  $V(\lambda)$ .

$$Y = 0.17697R + 0.81240G + 0.01063B \quad (20)$$

- **LUMA**

É usada em algoritmos de processamento digitais de imagens para imitar um desempenho de uma TV em cores. O *Photoshop* usa em edição de contraste para calcular o brilho médio. Existe um mito de que a *Luma* se aproxima bem do *brilho*, porém não é sempre verdade.

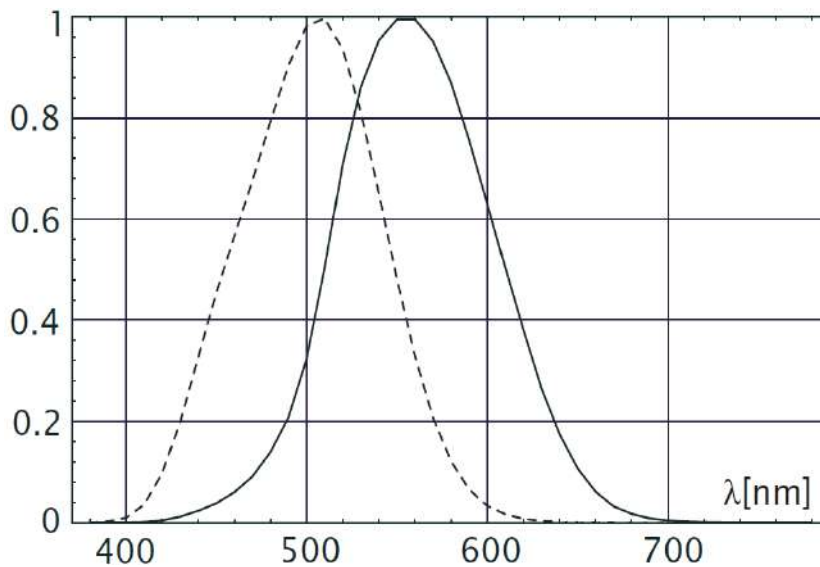


Figura 8: Resultado do espectro relativo do ponto de visão humano sobre condições padrões da iluminação (CIE). A linha pontilhada corresponde à baixa irradiância e a linha não pontilhada é a alta irradiância de uma iluminação ideal, Fonte de Jähne et al. (1994).

- **BCH** (*Brightness, Chroma, Hue*).

É um método que utiliza o comprimento da onda para obter o brilho. Este modelo fornece uma adequação para se modificar a imagem (COHEN, 2000). Esta técnica está

baseada nas medidas métricas colorimétricas de Cohen a fim de obter o comprimento do brilho, utilizando-se os valores *triestimulus* do sistema XYZ (JÁHNE, 2005).

$$B = D + E + F \quad (21)$$

Este sistema é válido para a detecção do brilho devido à apresentação de uma sensibilidade bem mais eficiente que outros métodos, podendo tal sistema facilitar na manipulação do brilho sem a necessidade de modificação de outros parâmetros, com uma mudança rápida na cor. Segundo Gomes, (2013), diz-se que os valores variam de 0 a 354.822, já que a *Luminância* vai somente de 0 a 255.

#### ➤ Intensidade Luminosa

É a forma mais popular de se obter o *brilho*, baseada no modelo de média aritmética, também conhecido como intensidade luminosa:

$$B = (R + G + B) / 3 \quad (22)$$

Esta forma, porém, apresenta a maior diferença em relação à *Luminância*. Outra maneira de cálculo é pelo HSV ou HSB (Brilho), em que se utiliza o valor máximo apresentado por uma das coordenadas do espaço RGB de cores. Entretanto, vale ressaltar que este método também apresenta grandes diferenças em relação à *Luminância*.

O brilho é importante no processamento da imagem, tendo um método para extrair esses dados de forma eficiente (GOMES, 2013). Observando inúmeras bibliografias e conceitos, conclui-se que não existe um padrão adequado para se inferir no cálculo do brilho.

Segundo Gomes (2013), mesmo com a falta de padronização, os métodos mais próximos estão baseados nos métodos da *Luminância* e no BCH, mais adequados para manipular diferentes imagens. A Figura 9 apresenta uma imagem com diferentes técnicas do brilho do oceano, e é que mais se destacou em termos de alto brilho, indo da letra d a letra “e”, mesmo aparentando ter poucas variações na percepção do olhar humano, são bastante importantes para a manipulação da imagem no parâmetro do brilho.

O brilho fornecido pelo modelo HSV (Figura 9) é o que melhor corresponde à percepção visual humana em relação à luma e à média aritmética, o que faz este modelo ser relativamente popular entre os fotógrafos. No entanto, o brilho do estímulo do azul é graduado como maior do que o estímulo do branco, o que não corresponde a real

percepção humana e reduz o valor deste método. No modelo **BCH**, o azul é mais bem representado em termos de brilho do que no modelo HSV. Obviamente, os modelos de Luminância ou BCH não são ótimos para todos os trabalhos de edição de brilhos em imagens digitais, porém, claramente apresentam vantagens em relação aos outros métodos.

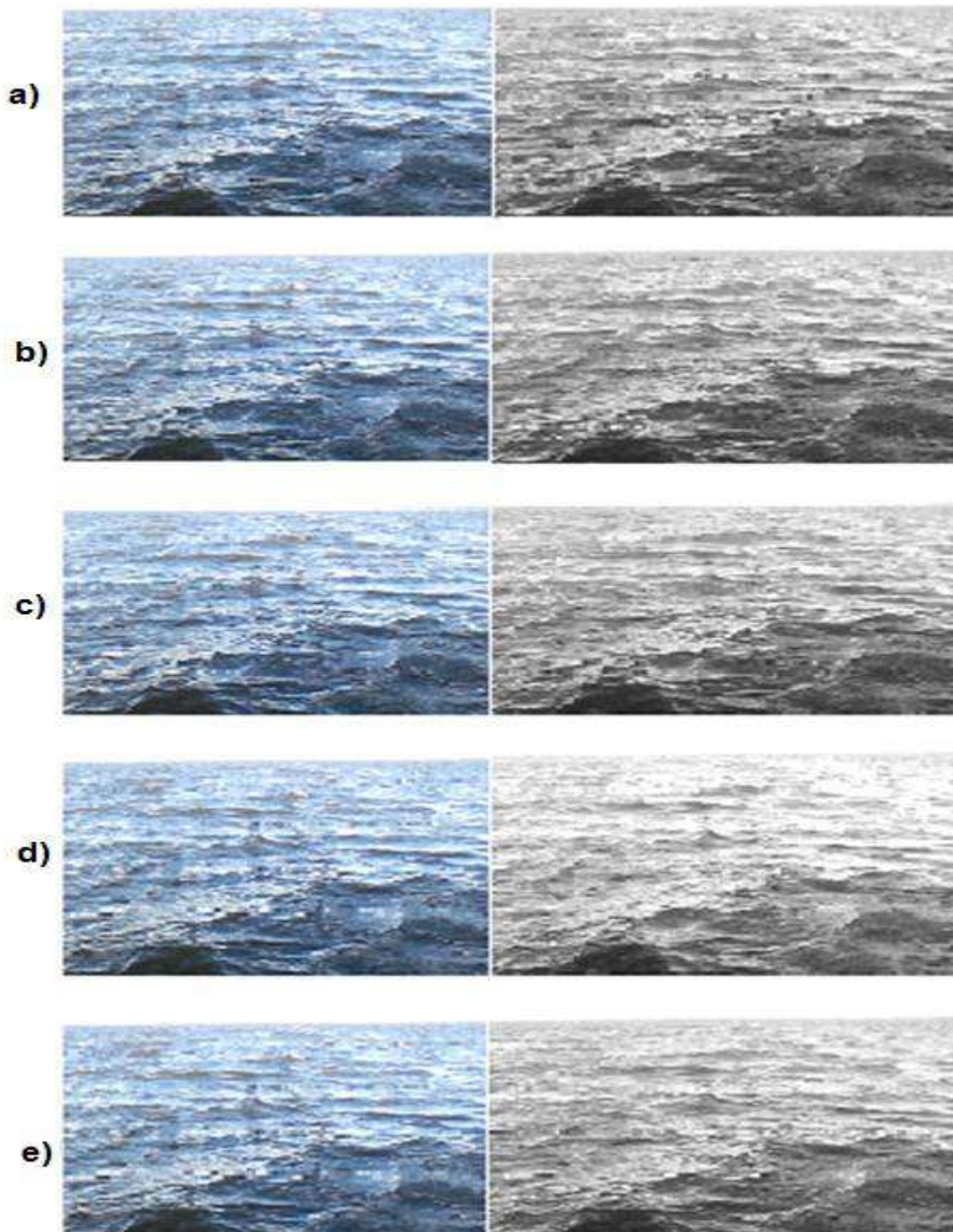


Figura 9: Imagem do oceano real (à esquerda) com as diferentes representações das técnicas de determinação do brilho. a) Luminância; b) Luma; c) Intensidade Luminosa; d) Value (HSV ou HSB); e) Bright (BCH). Fonte de Gomes, (2013).

De um lado, o brilho, por definição, é uma característica perceptível não mensurável. Por outro, ele é um parâmetro extremamente importante para o processamento digital de imagens, sendo necessário o uso de algum algoritmo capaz de



extraí-lo. Não há uma forma convencional para o cálculo do brilho, e diversos modelos não apresentam resultados satisfatórios, podendo diferir em mais de 10 vezes entre eles. O modelo BCH para medição de brilho, naturalmente, não corresponde à totalidade da percepção humana, mas é considerado uma boa opção entre os outros tipos de processamento de imagens depois da luminância.

## **1.4 Técnicas de processamento de imagem para Medições de Ondas.**

Neste item, serão abordadas algumas técnicas de processamento de imagem mais usadas para análises das ondas geradas na imagem. Também trata-se de parâmetros de onda, baseados na irradiância obtida no plano da imagem para determinação da inclinação da superfície do oceano, juntamente com as técnicas mais utilizadas na estrutura 3-D, sendo que, neste caso, é a partir de uma única imagem por meio da técnica de sombreamento (*Shape-From-Reflection*) e de refração da luz ou de lasers, (*Shape-From-Shading*), de reflexão da luz, natural, (*Shape-From-Refraction*) e do método de estereofotografia/vídeo. O último método utiliza-se de duas ou mais imagens simultâneas a fim de gerar um formato tridimensional da cena, sendo esta técnica mais utilizada entre as demais. Como revisão bibliográfica dessas principais técnicas, serão utilizados os estudos de Jähne (1993), Benetezo (2006) e Gomes (2013).

### **1.4.1 *Shape From Shading* (Sombreamento)**

Nos anos 70, Horn foi o primeiro a formular a *Shape From Shading*, consistente em adquirir informações sobre a orientação da superfície, utilizando-se somente a irradiância da imagem.

De acordo com Horn (1977), esse método consiste basicamente em uma fonte de luz em relação à Terra, no qual chamaríamos de Sol, que ilumina a superfície terrestre chegando a difundir o feixe de luz para todas as direções. Este exemplo se resume na radiância de cada ponto da superfície que o raio incidiu e o ângulo de inclinação em relação à incidência da luz solar sobre a superfície incidida.

Na equação 23, será estudado o desenvolvimento do espaço-gradiente, que é a

relação entre a irradiância do plano imagem com a superfície. O espaço-gradiente é adquirido por duas componentes que têm a gradiente espacial da superfície (inclinação), (HORN, 1977) e (GOMES, 2013).

$$s = \nabla\eta = \left( \frac{\partial\eta}{\partial x}, \frac{\partial\eta}{\partial y} \right)^T = (s_1, s_2)^T \quad (23)$$

É importante dizer que apenas uma imagem serve para a reconstrução da estrutura da superfície através da orientação da imagem. Dos termos da equação 24, extrai-se que o  $\eta$  é a elevação da superfície, e por meio das componentes de inclinação de onda  $s_1$  e  $s_2$  se obtêm a elevação por relação inversa, demonstrada pela equação 24:

$$\eta = \int s_1 dx, \quad \eta = \int s_2 dy \quad (24)$$

O conceito da representação da superfície em função de sua orientação, tais como os raios refletidos e incidentes, é chamado de vetores no espaço-gradiente. Para simplificar o problema da observação da superfície do oceano, primeiramente, partir-se-á da premissa que as linhas de contorno do espaço-gradiente são paralelas. Logo, uma imagem, irá representar apenas uma componente de orientação da superfície. Cabe observar uma componente  $s_1(x)$ , (Equação 25), que é a derivada espacial da elevação  $\eta$  no eixo  $x$ , por meio de uma análise, utilizando-se a técnica de Fourier (JÂHNE, 1993):

$$\hat{s}_1(k) = ik \cos(\alpha) \hat{\eta}(k) \quad (25)$$

Analisando os termos da equação (25), o  $\alpha$  é o ângulo entre a direção  $x$  e a direção verdadeira de propagação da onda. Pode-se dizer que  $s_1$  fica menor com o ângulo  $\alpha$  e se aproxima de  $90^\circ$ . Logo, a onda se propaga mais em direção ao eixo  $y$ . No entanto, quando este ângulo for  $90^\circ$ , é possível observar a onda na imagem, mesmo observando sua componente  $x$ . Portanto, somente a onda que se propaga em uma única faixa de direção poderá ser visualizada, sendo impossível a sua reconstrução completa na superfície do oceano com uma imagem (JÂHNE, 1993).

Ainda segundo Gomes (2013), uma solução interessante para este método é o emprego de duas câmeras perpendiculares à superfície do oceano com imagens simultâneas. Com as componentes  $S_1$  e  $S_2$  da inclinação, seria possível visualizar as direções de propagação das componentes da onda.

### 1.4.2 *Shape-From-Reflection* (Reflexão)

Depois do estudo do problema anterior sobre o método de sombreamento, cabe a abordagem da superfície especular altamente refletiva.

A técnica de reflexão tem sido desenvolvida para superfícies difusas opacas. No entanto, a superfície do oceano é transparente e possui uma superfície especular refletiva. É óbvio que a técnica de *Shape From Shading* não se aplica com fontes de luz pontuais, já que é usada e aplicada para superfícies foscas. Se uma fonte de luz pontual, como o sol, está iluminando a superfície do oceano, a superfície irá conter reflexos especulares seguindo a condição de que o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão. Com vetores unitários, essa condição é expressa por (JÁHNE *et. al*, 1994):

$$\bar{n} = \frac{\bar{l} - \bar{r}}{2\cos\alpha} \quad (26)$$

O  $\bar{n}$ ,  $\bar{l}$  e  $\bar{r}$  são vetores unitários coplanares representantes das direções dos raios refletidos e incidentes e da superfície normal. O  $\alpha$  é o ângulo de incidência formado pelos vetores  $\bar{l}$  e  $\bar{n}$ . Com uma fonte de luz pontual, apenas pontos com certas inclinações poderão ser identificados no plano da imagem, mas o imageamento contínuo da inclinação da onda não é possível, pois isso iria requerer uma fonte estendida.

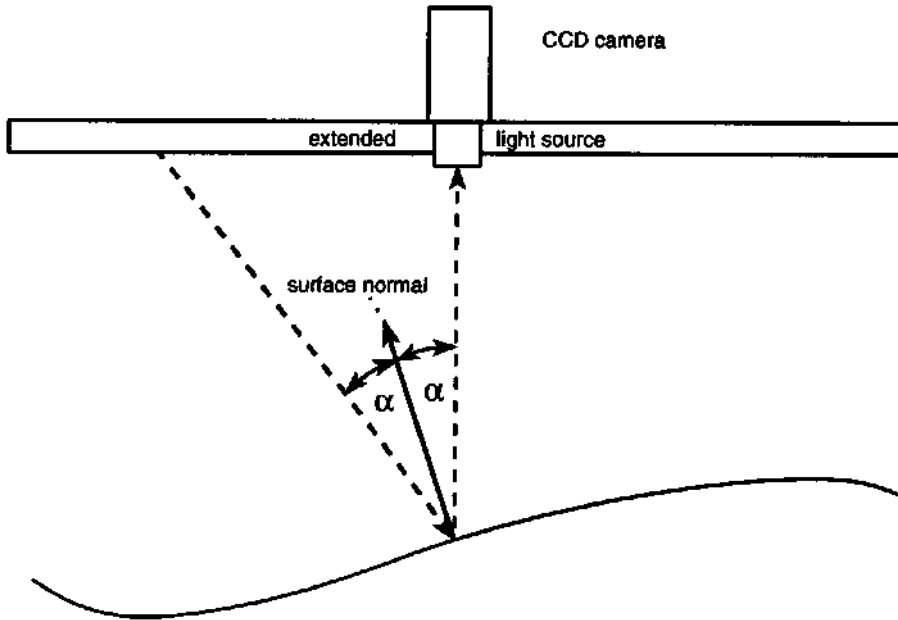


Figura 10: Desenho esquemático da técnica de reflexão sobre uma imagem de inclinação em relação à onda. Fonte (JÄHNE *et. al.*, 1994).

Para um caso idealizado de luz estendida e isotrópica, contudo, de radiância não homogênea, a inclinação da superfície da onda irá determinar de qual ponto da fonte de luz a faceta será iluminada. Neste sentido, a posição do raio incidente vindo da fonte estendida depende da inclinação da onda. Essa relação é a essência do mecanismo de imageamento da inclinação da onda (Figura 10).

Pode-se relacionar a  $\tan(\alpha)$ , que representa a inclinação total  $s$ , com a  $\tan(\delta)$ , onde  $\delta = 2\alpha$ , por:

$$\tan \delta = \frac{2 \tan \alpha}{1 - \tan^2 \alpha} = \frac{2s}{1 - s^2} \quad \text{para } s < 1 \quad (27)$$

$$\tan \alpha = s = \frac{\tan \delta}{1 + [(1 + \tan^2 \delta)]^{1/2}} \quad (28)$$

Considera-se uma fonte de luz isotrópica que emite somente radiância constante em uma direção, variando linearmente a radiância na direção contrária, expressa por:

$$L \propto X$$

Tem-se que o  $L$  é a radiância e  $X$  a direção em que ela varia. Deste modo, a relação entre a posição do raio incidente nesta direção de radiância variável e a  $\tan \delta$  é dada por:

$$\frac{X}{Z} = \cos \varphi \tan \delta = \frac{s_1}{s} \tan \delta \quad (29)$$

O ângulo de azimute  $\varphi$  está em relação à direção de propagação da onda. Com esse modelo, a irradiância  $E$  obtida no plano da imagem será proporcional à radiância  $L$  e ao coeficiente de reflexão da superfície da água  $\rho$ . As fórmulas de *Fresnel* relacionam o coeficiente  $\rho$  com os ângulos de incidência  $\alpha$  e de refração  $\beta$ :

$$\rho_{\parallel} = \frac{\tan^2(\alpha - \beta)}{\tan^2(\alpha + \beta)}, \quad \rho_{\perp} = \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \quad (30)$$

Os sub-índices  $\parallel$  e  $\perp$  representam os coeficientes para polarização horizontal e vertical, respectivamente, bem como a média entre eles representada pelo coeficiente de reflexão não polarizado.

Os ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  estão relacionados através da *Lei de Snell*:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_a \quad (31)$$

onde  $n_a$  é o índice de refração da água. Como a inclinação da onda é  $s = \tan \alpha$ , é usando a equação (32) da *Lei de Snell*, que expressa os coeficientes de reflexão como função da inclinação da onda da seguinte forma (JÄHNE, 1993):

$$\rho_{\perp} = \left( \frac{\sqrt{n_a^2 + (n_a^2 - 1)s^2 - 1}}{\sqrt{n_a^2 + (n_a^2 - 1)s^2 + 1}} \right)^2, \quad \rho_{\parallel} = \left( \frac{\sqrt{n_a^2 + (n_a^2 - 1)s^2 - n_a^2}}{\sqrt{n_a^2 + (n_a^2 - 1)s^2 + n_a^2}} \right)^2 \quad (32)$$

A partir desta equação, a irradiância na imagem pode ser expressa por (Jähne, 1993):

$$E \propto s_1 \frac{\rho(s)}{1 - s^2} \quad (33)$$

Para a luz não polarizada e  $n_a = 4/3$ , a irradiância obtida no plano da imagem passa a ser função exclusivamente da inclinação da onda  $s$ . Como o termo não linear no denominador da equação (33) é pequeno para pequenas inclinações, espera-se que a relação seja linear entre a inclinação e a irradiância para valores de  $S$  pequeno da onda. Contudo, esta linearidade não é válida para uma grande gama de inclinações (Figura 11).

Observa-se que a distância entre as linhas de contorno indica um crescimento significativo na sensibilidade à inclinação, assim como o valor absoluto da inclinação. Destas observações, pode-se concluir que a técnica de *Shape From Reflection*, funciona bem apenas para uma estreita faixa de inclinações. Além das significativas não linearidades, existem razões práticas para tais limitações. Outra desvantagem é a baixa refletividade de superfícies de água para ângulos muito pequenos de incidência. Para a luz não polarizada, a refletividade é 2% à  $0^\circ$  e 2.8% à  $45^\circ$ . Portanto, uma fonte de luz intensa luminosa é necessária. Dadas as dificuldades inerentes do sistema de imageamento da inclinação da onda com iluminação artificial, a única opção que resta é basear a técnica de reflexão, utilizando a iluminação natural do dia.

Como uma forma de melhorar o modelo, é necessária a iluminação do dia, pois o ângulo será maior, mas com a ideia das condições de iluminação apropriadas serão raras, já que a iluminação do céu deve variar em apenas uma direção. Estas condições podem ser alcançadas apenas com céu limpo ou completamente nublado. Resta dizer, obviamente, que nenhuma medição é possível à noite, de acordo com Stilwell (1969) e Stilwell & Pilon (1977).

Basicamente, estes trabalhos tiveram como objetivos a criação de modelos para relacionar a irradiância obtida no plano da imagem com a inclinação da superfície da onda, a partir de formulações semelhantes à equação (33).

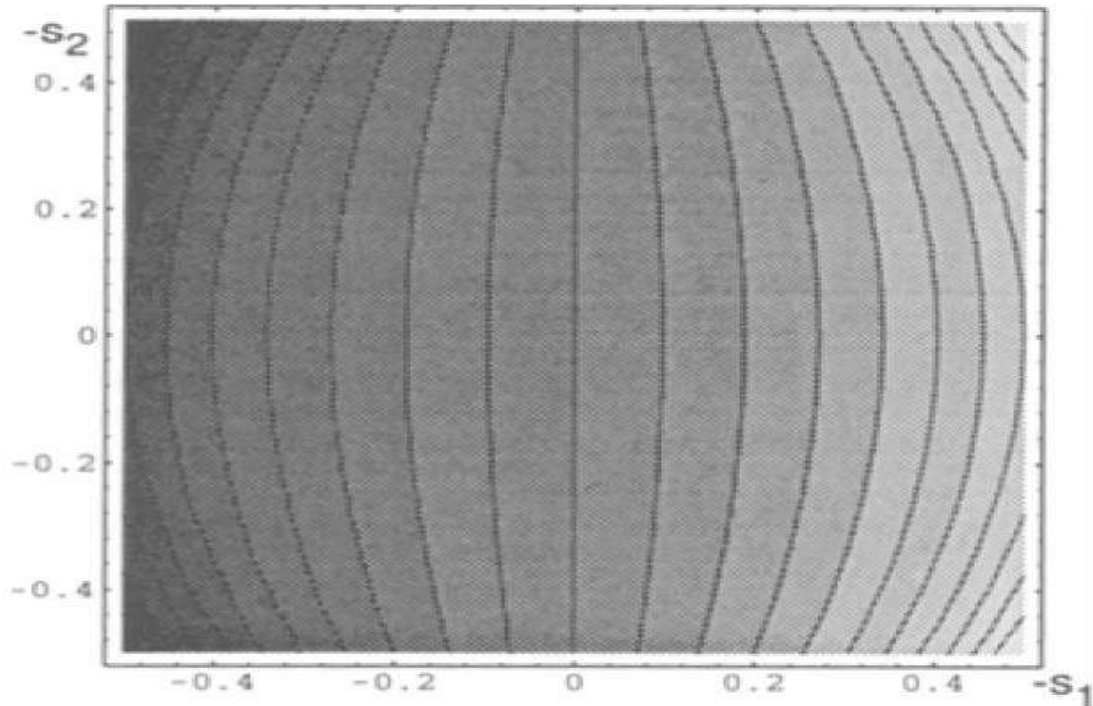


Figura 11: Linhas de contorno da irradiância para inclinações de onda entre -0.5 a 0.5 para as duas componentes, a partir da técnica baseada nos princípios de reflexão.  
 Fonte: Jähne, (1993).

Como ponto de partida, vale dizer que a radiância do céu é homogênea e isotrópica. Então, a irradiância recebida no plano da imagem depende apenas do coeficiente de reflexão  $p$  da superfície da água. A geometria no espaço gradiente é similar àquela configuração com fonte de luz artificial, devendo a câmera agora estar inclinada de tal modo a produzir uma irradiância que cresça com uma componente de inclinação. O ângulo de incidência  $\alpha$  é o ângulo de inclinação da câmera e da inclinação da onda, cujas componentes  $s_1$  e  $s_2$  são dadas pelo ângulo formado entre direção do raio refletido  $\vec{r}$  e a superfície normal. O vetor  $\vec{r}$  é sempre em direção à câmera e, com céu homogêneo e isotrópico, obtém-se a seguinte direção:

$$\vec{r} = (\tan \theta_c, 0, 1)^T \quad (34)$$

onde  $\theta_c$  é o ângulo de inclinação da câmera. A superfície normal pode ser expressa por um vetor transversal à inclinação da onda, dado pelo gradiente da superfície (equação 34), normalizado em  $z = 1$ :

$$\bar{n} = \left( \frac{\partial a}{\partial x}, \frac{\partial a}{\partial y}, 1 \right)^T \quad (35)$$

Portanto, o ângulo de incidência  $\alpha$  será descrito por:

$$\alpha = \arccos(\bar{r}, \bar{n}) = \arccos \left[ \frac{s_1 \tan \theta_c + 1}{(1 + s_1^2 + s_2^2)^{1/2} (1 + \tan^2 \theta_c)^{1/2}} \right] \quad (36)$$

Na equação (36), o ângulo de incidência está em função da inclinação da onda, dado pelas componentes  $s_1$  e  $s_2$ , e da inclinação da câmera  $\theta_c$ . Com a iluminação do céu, considerada homogênea e isotrópica, pode-se inferir a relação entre a inclinação da onda e a irradiância no plano da imagem dado pela equação (34), cuja irradiância está em função do coeficiente de reflexão, dado pela equação (35), que também necessita do ângulo de incidência, representado pela equação (36).

Portanto, a desvantagem do modelo é a necessidade manifesta de uma boa qualidade de iluminação, evento este não tão realístico na natureza, ou seja, o céu tem que estar totalmente homogêneo e isotrópico, variando em uma só direção. Esse método só torna-se possível em condições de céu sem nuvens, porque a nuvem gera fontes de iluminação secundárias, tendo reflexos adicionais na superfície d'água ou um céu totalmente nublado. Estas condições afetam bruscamente o método, não sendo útil em alguns casos.

### 1.4.3 Shape From Refraction (Refração)

Um bom método, para inferir a inclinação da superfície do mar através do método óptico, é o de refração da luz que resulta nos valores de inclinação da superfície do oceano. A água do mar é de composição translúcida, e tem grande quantidade de penetração da luz, esta característica torna este método muito eficiente. O raio incidente, sendo perpendicular ao eixo horizontal, fará com que a direção do raio seja refratada conforme equação (37), e com isso dependerá da inclinação da interface que separa a superfície do mar (Hughes, 1977).



Oposto à reflexão (*Shape From Reflection*), esta técnica possibilita estimar uma gama maior de inclinações a partir da irradiância da imagem, a qual apresenta uma característica linear diferente do método de reflexão (JÄHNE *et. al*, 1994).

O sistema é constituído em apenas um raio de luz, que passa pela interface até chegar ao receptor óptico. Logo, pode-se utilizar esta técnica de duas formas: a câmera estando totalmente submersa voltada para cima, capturando a luz refratada que é emitida de uma fonte que fica acima da superfície d'água; e outra forma com a câmera posicionada totalmente acima da superfície da água, voltada para baixo com a fonte de luz localizada abaixo da superfície da água (Figura 12). O uso de lentes convergentes pode ser um possível método diferente dos demais, com a função de focar vários raios em um único ponto de feixe de luz, surgindo uma irradiância na imagem. (TOBER, *et al.*, 1973; HUGHES, *et al.*, 1977; GOMES, *et al.* 2013).

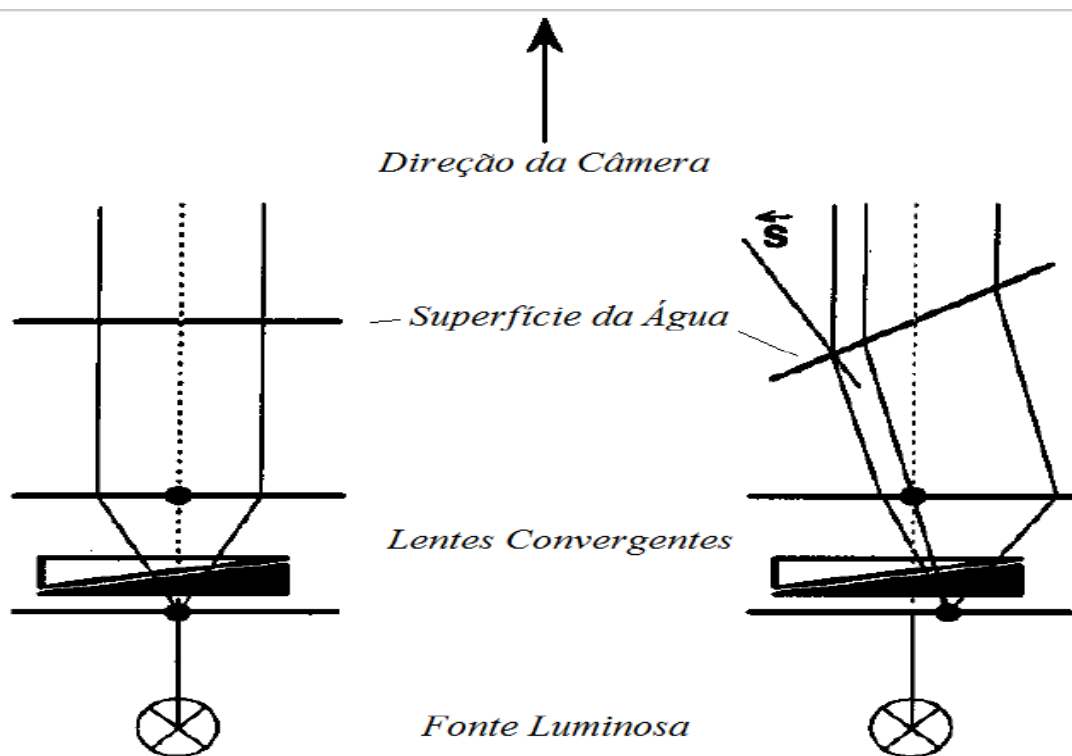


Figura 12: Desenho ilustrativo da configuração do sistema de medição de inclinação da superfície, baseado no sistema de refração para uma câmera configurada a acima da superfície da água e a fonte abaixo da água. Adaptado de Jähne, *et al*, (1993).

Segundo Lange *et al.*,(1982), na equação (37), é relatado como a câmera acima da superfície da água e da fonte luminosa submersa tem relação com a inclinação do ângulo do raio refratado e da superfície da água  $S$  , demonstrada por:

$$s = \tan \alpha = \frac{n_a \tan \gamma}{n_a - (1 + \tan^2 \gamma)^{1/2}} \quad (37)$$

Sendo que  $\gamma = \alpha - \beta$  é o ângulo do raio refratado. Tem-se:

$$\tan \gamma = \tan \alpha \frac{[n_a^2 + (n_a^2 - 1) \tan^2 \alpha]^{1/2} - 1}{[n_a^2 + (n_a^2 - 1) \tan^2 \alpha + \tan^2 \alpha]^{1/2}} \quad (38)$$

No caso inverso, em que a câmera está configurada abaixo da superfície da água e a luz no ar, há a representação da seguinte equação:

$$s = \tan \alpha = \frac{\tan \gamma}{n_a (1 + \tan^2 \gamma)^{1/2} - 1} \quad (39)$$

A relação da irradiância adquirida na imagem e na inclinação é igual à técnica da reflexão. Como a luz isotrópica varia de acordo com a intensidade (linear), apenas em uma direção. será demonstrado por (JÂHNE, 1993):

$$\frac{X}{f} = \cos \varphi \tan \gamma = \frac{s_1}{s} \tan \gamma \quad (40)$$

De acordo com a equação (41), considerando a câmera na água, variando a radiância linearmente em direção à ( $X$ ) e tendo as perdas de reflexão, tem-se a relação entre a inclinação da superfície e a irradiância na imagem (JÂHNE, 1993):

$$E \propto s_1 [1 - \rho(s)] \frac{[n_a^2 + (n_a^2 - 1)s^2]^{1/2} - 1}{[n_a^2 + (n_a^2 - 1)s^2]^{1/2} + s^2} \quad (41)$$

Considerando  $n_a = 3/4$  tem-se:

$$E \propto s_1 [1 - \rho(s)] \left( 1 - \frac{3}{32} s^2 + \frac{39}{2048} s^4 \right) \quad (42)$$

Por fim, este método está baseado nos princípios de refração e tem auxiliado bastante nos modelos de reflexão. É importante dizer que este modelo não pode ser implementado em

campo, ou seja, no oceano. Essa delimitação ocorre devido à iluminação do local, sendo que, em laboratório, fica mais viável a manipulação das configurações do local.

#### **1.4.4. Estereoscópica**

Este método consiste em que a profundidade de uma imagem seja identificada por meio dos dois olhos simultaneamente, quando assim se obtém a terceira dimensão da imagem. A percepção de profundidade monoscópica permite apenas uma sensação de desnível, a percepção binocular possibilita um grau de acurácia muito mais definida (BENETAZZO, 2006).

De acordo com o entendimento de Weil, (2005), para o uso da técnica de estereoscopia com pares de imagens fotográficas, a qual é chamada de estereofotografia, as duas câmeras devem estar instaladas paralelamente com a mesma altura uma da outra a fim de se direcionarem para a superfície com sobreposição do campo visualizado (Figura 13).

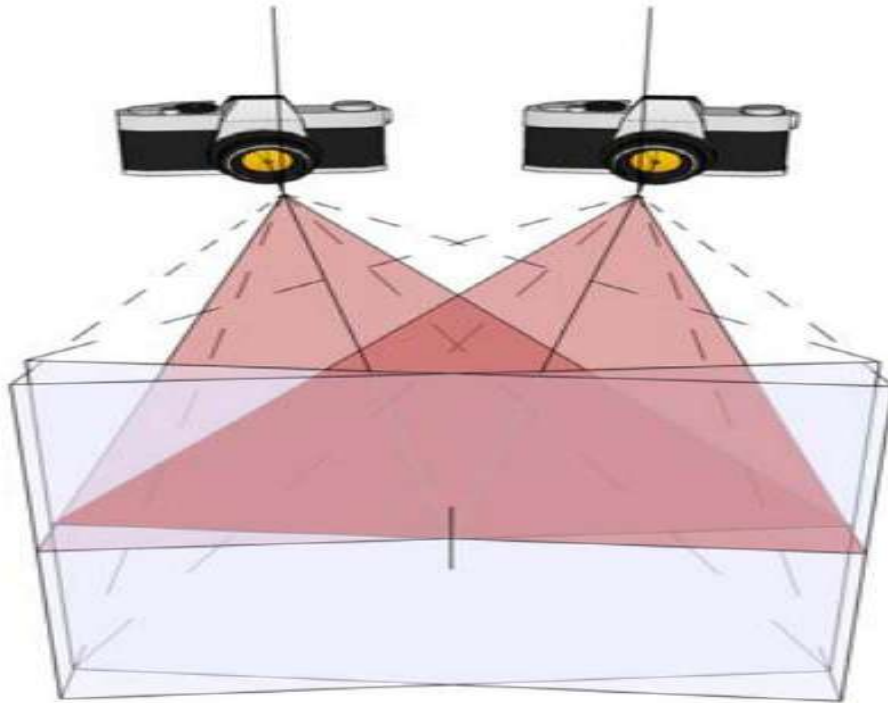


Figura 13: Esquema utilizando duas câmeras para sobreposição de imagem. Fonte: <http://people.ufpr.br/~felipe>.

Dessa forma, há uma relação entre as coordenadas de um ponto qualquer na superfície real e no pixel da imagem das duas câmeras. Cada ponto  $P$  da superfície, referenciado em coordenadas reais  $(x_p, y_p, z_p)$ , é representado para as duas câmeras nas coordenadas de cada imagem  $(X_1, Y_1)$  e  $(X_2, Y_2)$ , como mostra o esquema da Figura 14.

Estes pontos correspondentes são denominados pontos homólogos. A diferença na coordenada em cada uma das imagens está diretamente ligada aos diferentes ângulos da posição de cada câmera (Figura 13).

Na seção horizontal da imagem, a diferença entre os pontos  $X_1 - X_2$  é considerada uma paralaxe, onde  $p$  é a distância relativa em relação aos pontos de posição da Cam1 e Cam2 (Figura 14). Basicamente, a partir do que foi comentado acima, pode-se estimar as coordenadas reais de um ponto  $(x_p, y_p, z_p)$  através da semelhança geométrica:

$$x_p = \frac{B(X_1 + X_2)}{2(X_1 - X_2)}, \quad y_p = \frac{B \cdot Y_1}{(X_1 - X_2)}, \quad z_p = \frac{B \cdot f}{(X_1 - X_2)} \quad (43)$$

Na Equação (), é possível observar que  $p$  ( $X_1 - X_2$ ) é uma distância diretamente proporcional à distância focal da lente. A distância entre os eixos ópticos é inversamente proporcional à distância para o objeto (WEIL, 2005):

$$p = (X_1 - X_2) = \frac{Bf}{z_p} \quad (44)$$

A Figura 14 nos mostra que  $B$  é a distância do eixo óptico, chamado de base estereoscópica. O  $f$  é a distância focal das câmeras.

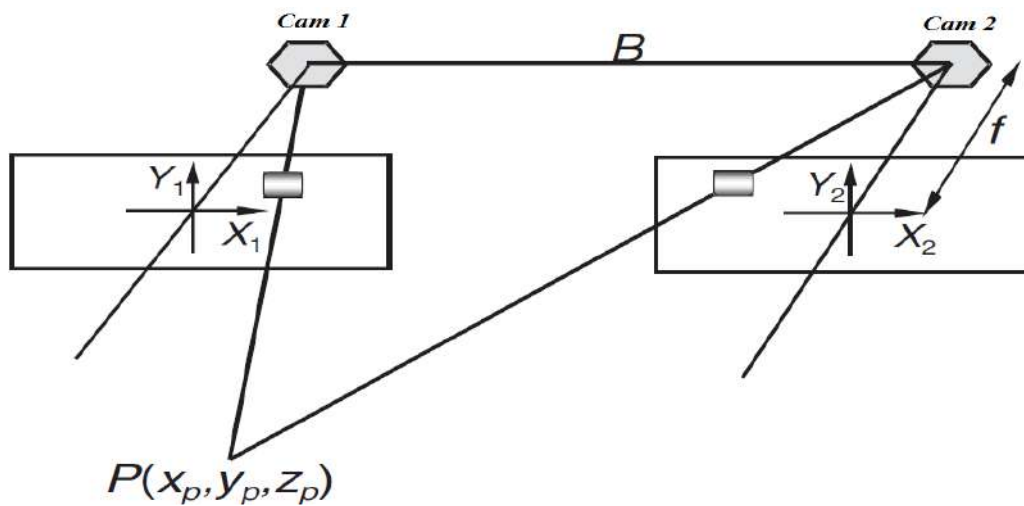


Figura 14: Desenho ilustrativo da geometria básica da estereofotografia. WEILL *et al.* (2005).

Um dos principais problemas da estereofotografia é a identificação da coordenada exata de um ponto (pixel) em uma imagem que corresponde ao seu homólogo na respectiva imagem correspondente da outra câmera. Para se analisar pontos contrastantes, em um cenário ou superfícies em que a heterogeneidade das características ópticas seja evidente, por exemplo, pode ser relativamente simples. Porém, em ambientes sem uma referência contrastante, ou com uma maior homogeneidade, isso pode se tornar extremamente complexo (GOMES, 2013).

Os resultados de Jähne (1993) demonstram que uma forma do sistema estereoscópico bastante utilizado é o de câmeras com eixos angulados. Esses eixos angulados podem aumentar a área sobreposta entre os campos de visualização das duas câmeras. Assim sendo, fica mais fácil obter maiores números de pontos iguais a fim de serem analisados estereoscopicamente (Figura 15), e as duas câmeras estão separadas por uma distância  $B$  de tal forma que há uma interseção entre seus eixos, encontrados na superfície da água  $Z$ , sendo que sua paralaxe  $p$  está para um ponto de distância  $Z - \Delta Z$  (ZÄHNE, 1993):

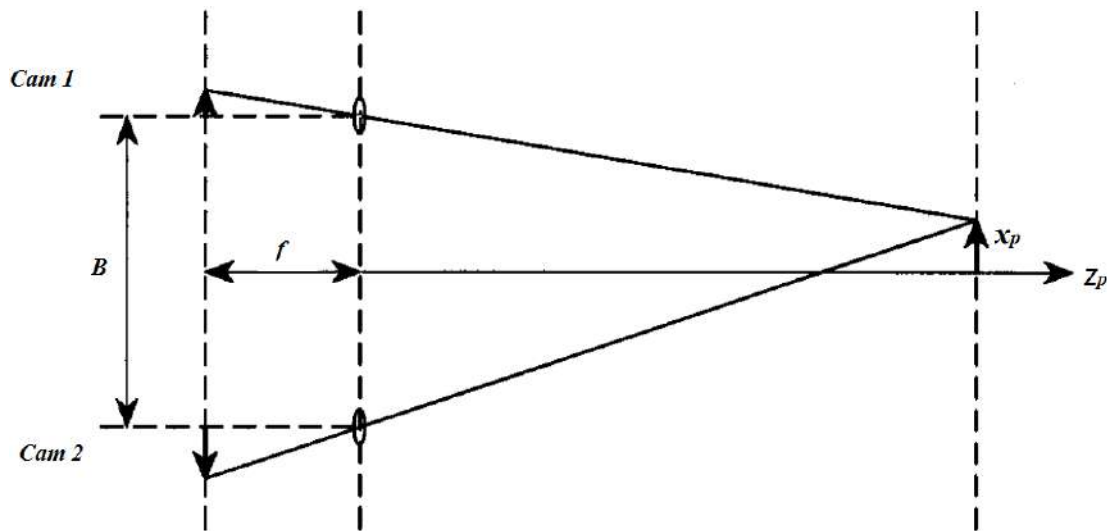


Figura 15: configuração estereoscópica para eixos ópticos das câmeras paralelos. Jähne, (1993).

$$p = \frac{f \Delta Z}{Z - \Delta Z \cos^2(\beta/2)} 2 \operatorname{sen}(\beta/2) \cos(\beta/2) \quad (45)$$

O ângulo  $\beta$  é o ângulo entre as duas câmeras. A distância entre a câmera  $B$  pode ser obtida através do ângulo entre as câmeras; e da distância  $Z$ , a partir da geometria trigonométrica da configuração. A resolução relativa de altura no sistema estereoscópico para  $\Delta Z \ll Z$ , e a paralaxe  $p$  é diretamente proporcional a  $\Delta Z$ . Essa aproximação é suficiente para os procedimentos computacionais para a resolução de altura. A resolução de altura relativa pode ser expressa como:

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{p}{2f \operatorname{sen}(\beta/2) \cos \beta/2} \quad (46)$$

É necessário programar um sistema estereoscópico eficiente, de tal modo que a intersecção entre os eixos ópticos seja próximo ao nível real das flutuações locais do oceano, fazendo com que  $\Delta Z$  não varie muito em função da distância  $Z$ . Sendo assim, a resolução relativa horizontal é:

$$\frac{\Delta x}{\Delta X} = \frac{f \cos(\beta/2)}{Z} \quad (47)$$

onde  $\Delta x$  é a resolução horizontal no plano da imagem, e  $\Delta X$  é a resolução horizontal na superfície da água, sendo projetada de uma linha horizontal na superfície de forma oblíqua ao plano da imagem. Logo, tem-se a relação entre a resolução vertical e horizontal, equação (48).

$$\frac{\Delta Z}{\Delta X} = \frac{p}{2 \tan(\beta/2) \Delta x} = \frac{pZ}{B \Delta x} \quad (48)$$

Sendo que a paralaxe  $p$  nas imagens é um múltiplo discreto da resolução no plano da imagem  $\Delta x$  na forma  $p = c \Delta x$ , conforme explicitado abaixo:

$$\frac{\Delta Z}{\Delta X} = c \frac{Z}{B} \quad (49)$$

Em que a razão  $Z/B$  é bastante importante na configuração do sistema estereoscópico para medição de ondas, pois se infere a inclinação das ondas (BENETAZZO,2006). O valor escolhido é a maneira de se alcançar uma sobreposição entre os campos de visão das imagens sem misturar a angulação entre os eixos ópticos. Segundo Jähne (1993) e Benetazzo (2006), a razão  $Z/B$  normalmente está na faixa de 0.3 e 0.75 na estereoscopia aplicada na análise de onda no mar.

Benetazzo (2006) mostra que o valor do erro máximo relativo está em relação à coordenada vertical do estereoscópico. Conforme a fórmula abaixo:

$$erro_z = \frac{Z \sen \beta}{B L_i \cos(\beta/2 + Ab/2)^2} \quad (50)$$

O  $Ab$  corresponde à abertura angular do campo de visão da câmera O termo  $L_i$  corresponde à largura da imagem em pixels. Os erros máximos horizontais são ilustrados por:

$$erro_x = \frac{1}{2L_i} \frac{\text{sen}(Ab)}{\cos(\beta/2 + Ab/2)^2}, \quad erro_y = \frac{1}{2L_i} \frac{\text{sen}(Ab)}{\cos(Ab/2)^2} \quad (51)$$

Contudo, os erros devem ser considerados e cuidadosamente selecionados para que tenha um bom sistema em funcionamento.

#### **1.4.4.1 Aplicação do método de Estereografia/vídeo para medição de ondas**

A medição das ondas a partir do método de estereofotografia se baseia no princípio de que a partir de duas imagens correspondentes da superfície do oceano com a área ótima de sobreposição (overlap) de 60% (COTE et. al., 1961) torna-se possível identificar cada ponto (pixel) correspondente nas duas imagens. A partir daí, empregando os princípios estereoscópicos apresentados anteriormente, se define um campo tridimensional (x, y, z) do oceano. Posteriormente, realiza-se uma análise de Fourier bidimensional (x e y), obtendo-se o espectro de número de onda (k) e os principais parâmetros de onda passíveis de serem calculados (altura significativa e frequência de pico).

Uma das principais dificuldades da aplicação do processamento dá-se em uma superfície irregular e dinâmica, como o oceano. Essa técnica se torna vantajosa em levantamentos topográficos (regiões com pontos fixos), tornando-se fácil para aquisição de imagens e identificação dos pontos (pixel) iguais. Entretanto, no oceano, deve-se considerar uma precisão extrema devido a mudanças bruscas na geometria do local. É importante ainda um sincronismo preciso entre as câmeras, ou seja, o intervalo máximo entre as fotografias deve estar em 10 ms (milissegundos), a fim de obter um dado mais realístico Holthuijsen (1983).

Antigamente, os primeiros estudos eram realizados através de aeronaves sobrevoando a uma mesma altitude capturando as imagens (COTE et. al., 1956). Esse experimento tinha como vantagem a possibilidade de analisar os comprimentos de ondas em um determinado local e sua maior cobertura espacial. De outro lado, outra forma de medição era a utilização de câmeras instaladas paralelamente às plataformas fixas ou praias, porém esta técnica limita a área de cobertura e os períodos de onda. Por



consequente, o uso das técnicas estereoscópicas é a solução para as limitações citadas acima, que favorece a análise temporal e espacial do nível de elevação da superfície do mar (BENETAZZO, 2006).

#### **1.4.4.2. Principais problemas do método**

No que concerne a este método, além do problema de resolução, qualquer sistema estéreo que use iluminação natural está baseado na reflexão, e, em razão disso, sofre com o mais complicado problema de correspondência das imagens.

Este termo se refere ao problema de uma característica que aparece em uma imagem, e não, necessariamente, aparece na outra imagem. Em geral, a falta de correspondência está associada a ondas menos esbeltas e, essas imagens são descartadas com problemas de correspondência, podendo levar a uma análise apenas de imagens de ondas esbeltas e rugosas, tendência ao espectro. Outro fator que deve ser considerado é a oclusão causada pelas cristas que pode impedir a correspondência em certas regiões da imagem.

Assim, os problemas relacionados ao método no oceano são os seguintes: falta de pontos homólogos, de correspondente nas imagens, e de dinamismo do oceano. Vale acrescentar que outra dificuldade é a implementação na área operacional, uma vez que necessita de alta precisão na resolução da câmera, além de configurar a câmera para que eventos da natureza não atrapalhem as filmagens, tais como: ventos, chuvas e outros eventos que podem danificar a câmera.

#### **1.5.1 Parâmetros da onda adotados**

Como visto anteriormente nas seções apresentadas, determinar a estrutura da superfície do oceano é importante para o processo.

Neste sentido, a estereoscopia auxilia na obtenção do resultado direto da elevação do mar através do uso de duas câmeras. O método, que usa apenas uma câmera, obtém apenas a orientação, representada pela componente de inclinação. Ambos os métodos fornecem a completa visualização do campo de ondas. Tendo como ferramenta a análise temporal e espectral que auxiliam na determinação dos parâmetros da onda.

Por meio do processamento de uma sequência de imagens (vídeo), com aquisição maior que a frequência de Nyquist, a dimensão espacial do campo amostrado se tornará um fator limitante. O vídeo consegue analisar vários pontos específicos no domínio da frequência, apresentando, desta forma, um grande número de pontos no espaço temporal, fornecendo as séries temporais da elevação da superfície do mar (BENETAZZO, 2006). Logo, a análise espectral temporal será:

$$S(\omega) = \int_0^{\infty} f(t) \exp(-i\omega t) dt \quad (52)$$

O  $\omega$  é a frequência angular.

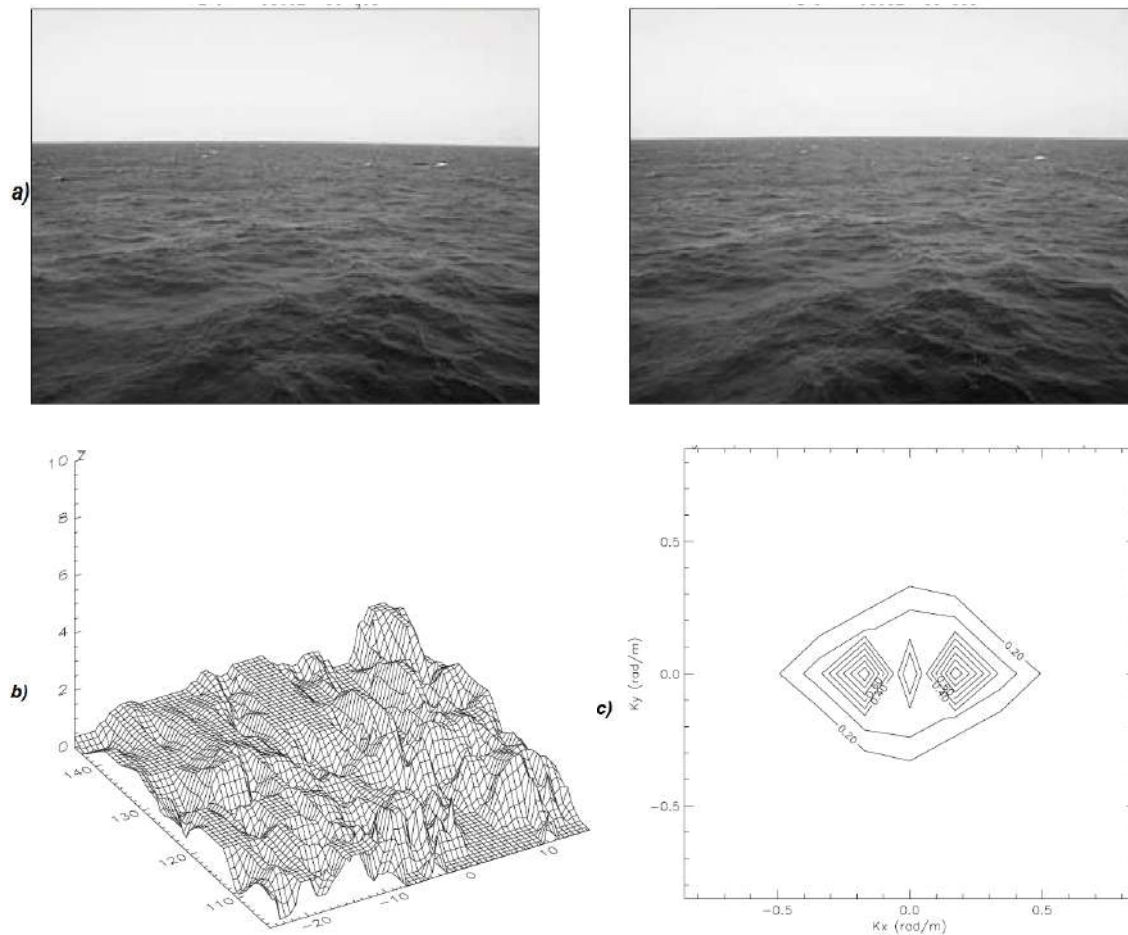


Figura 16: Análise da estereoscópica de um par de imagens para obtenção do espectro do número de ondas: a) aquisição de duas imagens simultâneas com câmeras diferentes; b) obtenção da distribuição espacial das elevações da superfície; c) gráfico do espectro de número-de-onda. Benetazzo, 2006.

Conforme a Figura 16, o período de pico  $T_p$  é demonstrado por:

$$T_p = \frac{1}{f_p} \quad (53)$$

onde  $f_p$  é a frequência de pico ou a frequência espectral com valor máximo de energia.

A altura significativa de onda é obtida através do momento espectral de ordem zero, representado pela variância total  $\sigma^2$  das imagens:

$$m_0 = \int_0^\infty S(f)df = \sigma^2 \quad (54)$$

$$H_s = 4.01\sqrt{m_0} \quad (55)$$

A direção de propagação das ondas é calculada através da análise espacial, resultando na sua propagação. Ademais, as distribuições espaciais e temporais da elevação obtêm diretamente a direção da propagação. Por último, a superfície livre  $\eta$  do oceano na presença de uma onda representada por:

$$\eta(x, y, t) = a \cos(k_x \cos \theta + k_y \sin \theta - \omega t + \varepsilon) \quad (56)$$

as duas componentes de inclinação são:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial x} = \eta_x &= -ak \cos \theta \sin(kx \cos \theta + ky \sin \theta - \omega t + \varepsilon), \\ \frac{\partial \eta}{\partial y} = \eta_y &= -ak \sin \theta \sin(kx \cos \theta + ky \sin \theta - \omega t + \varepsilon) \end{aligned} \quad (57)$$

Os espectros cruzados entre as componentes de inclinação e a elevação são dados por:

$$\begin{aligned} S_{\eta\eta_x} &= -a^2 k \sin \theta, \\ S_{\eta\eta_y} &= -a^2 k \cos \theta, \\ S_{\eta_x\eta_y} &= -a^2 k^2 \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \quad (58)$$

Fazendo:

$$A = \frac{S_{\eta\eta_x}}{a^2 k} = \cos \theta \quad e \quad B = \frac{S_{\eta\eta_y}}{a^2 k} = \sin \theta \quad (59)$$

Pode-se obter a direção de propagação  $\theta$ :

$$\theta(f) = \operatorname{atan} \left( \frac{B(f)}{A(f)} \right) = \operatorname{atan} \left( \frac{S_{\eta\eta_y}}{S_{\eta\eta_x}} \right) \quad (60)$$

$$\phi_t = \operatorname{atan} \left( \frac{b_f}{a_f} \right) \quad (61)$$

onde  $a_f$  e  $b_f$  são os coeficientes de *Fourier* do cruzamento espectral entre duas séries.

A fase espacial para um *array* com *pontos* é dada por :

$$\phi_e(n) = k(n - 1)d \cos \theta \quad (62)$$

onde  $d$  é a distância entre os pontos no *array* que deve ser menor que a metade do comprimento de onda mínimo ( $L/2$ ), respeitando o teorema de Nyquist. Portanto, quanto maior o *array*, maior a resolução espacial.

## 1.6 Objetivo e motivação

Os trabalhos nesta área de conhecimento ainda são escassos, portanto é importante essa nova ferramenta para estudos de parâmetros oceanográficos. Desta feita, faz-se necessário o aprimoramento do conhecimento nessa importante técnica a fim de obter um sistema mais barato, rápido e direto de análise de dados e lançar uma linha de pesquisa nessa área.

O objetivo geral deste trabalho é fazer uma análise de *frames* através da técnica óptica pelo imageamento a fim de se:

- estimar o período da onda em casos modais;
- estimar a altura de ondas, utilizando-se duas câmeras na filmagem.

# CAPÍTULO 2

## Metodologia

A principal metodologia adotada é a estereofotografia/vídeo que é aplicada em maior abrangência em condições operacionais a partir da utilização de duas câmeras. O principal fator limitante é a configuração do sistema estereoscópico ao sistema operacional e às condições da iluminação local.

O projeto, no qual este trabalho está inserido tem como intuito a implementação de um algoritmo capaz de processar e identificar por meio de fotografias digitais (*frames*) a superfície do oceano, utilizando dois métodos. O primeiro método tem por objetivo a obtenção do período de propagação da onda por meio do emprego de uma única câmera (GOMES, 2013).

Já o segundo necessita de duas câmeras a fim de obter a altura da onda através da técnica de semelhança de triângulo e a trigonometria, o qual possibilita a estimativa da altura da crista de onda (uni-modais). Nesta etapa do projeto, a abordagem realizada é o período e altura da onda no tanque oceânico. O uso de duas câmeras facilita o procedimento operacional de aquisição das imagens. A seguir, apresenta-se o procedimento metodológico para elaboração do trabalho:

- **aquisição e pré-processamento:** configuração da câmera e aquisição dos vídeos a serem analisados para o processamento. Após esta etapa, ocorre o pré-processamento em que é realizada a separação do vídeo adquirido em frames individuais (imagens em formato bitmap) e a organização dos arquivos, como o espaço amostral, taxa amostral, resolução espacial e tempo de duração do vídeo.
- **processamento:** o programa utilizado no processamento das imagens é basicamente desenvolvido pela linguagem Delphi. Este programa é chamado de ondômetro óptico que é capaz de analisar *frame* por *frame*, calculando o brilho de cada pixel na imagem, fazendo a análise temporal e espacial do comportamento da onda ao longo dos *frames*, e, conseqüentemente, identificando as cristas de ondas, tendo como intuito a obtenção da altura da onda. Um subprograma também utilizado é o Matlab, que calcula a altura da onda e faz a análise espectral do brilho e o período da onda. Atualmente, está sendo elaborado esse sistema também na programação C++.
- **pós-processamento:** resultados obtidos, observados e analisados pelo programa Delphi.

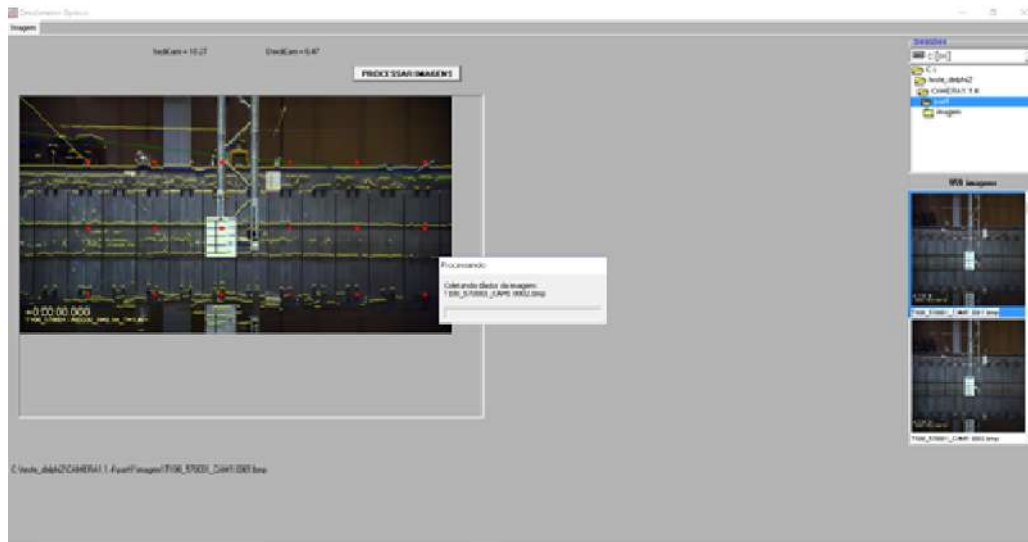


Figura 17: programa ondômetro óptico realizando processamento das imagens.

A Figura 17 é a interface do programa utilizado para gerar os resultados. Os pontos em vermelhos são pontos de referências para extração dos resultados gerados de intensidade e altura da onda.

As etapas de processamento, desde a aquisição e configuração dos dados até os resultados, serão demonstrados pela Figura 18.

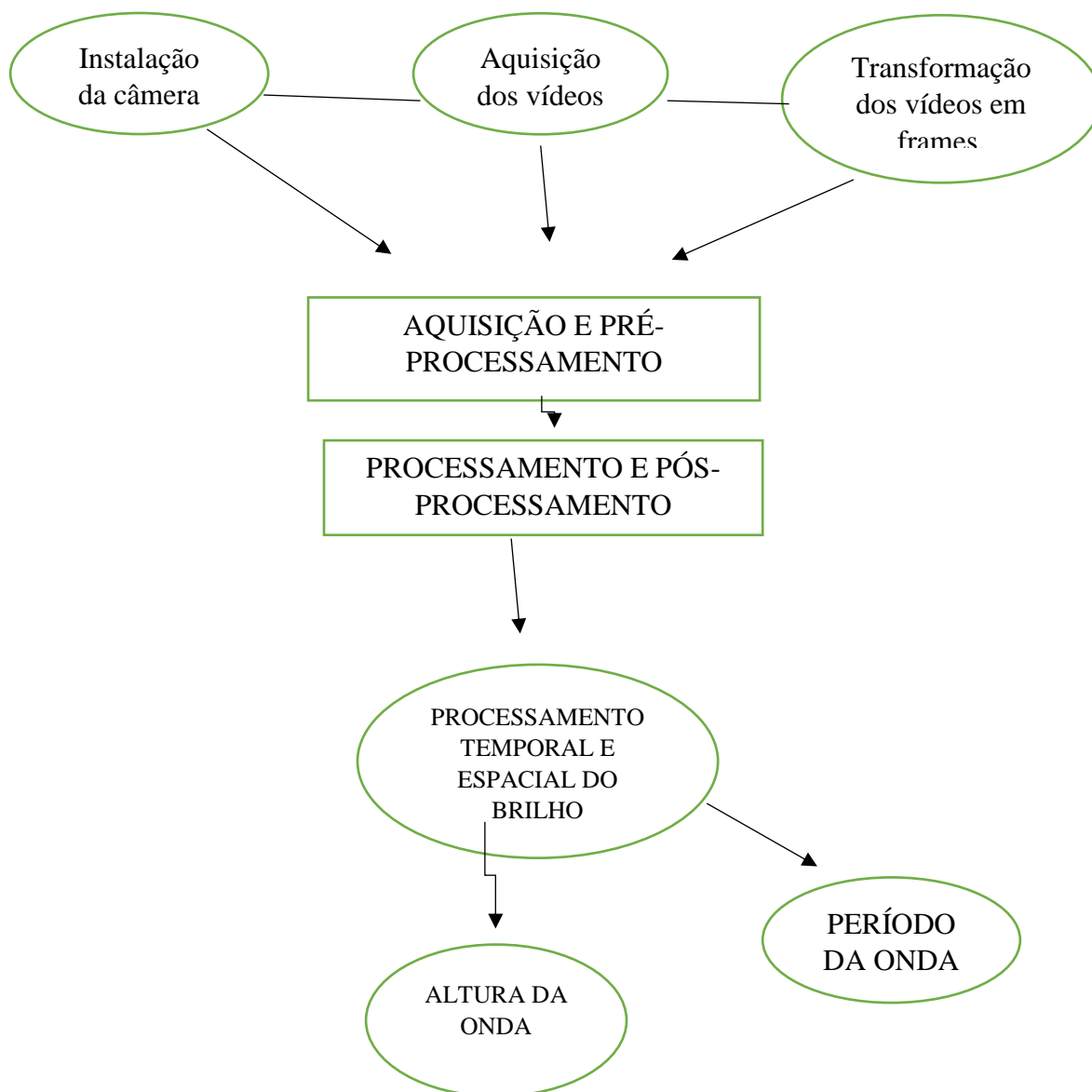


Figura 18: diagrama dos passos de processamento que estão sendo realizados no trabalho.

## 2.2 Configuração e aquisição das filmagens

A filmagem e a configuração das câmeras são fundamentais para um melhor resultado do modelo. As câmeras possuem sensores CCD (*Charge coupled device*) que, na maioria dos métodos citados anteriormente, utilizam os mesmos acoplados na câmera. Os sensores CCD, por serem de alta qualidade, são componentes favorecedores em locais de fatores limitantes, como a baixa iluminação do local filmado (BENETAZZO, 2006).



Na configuração das câmeras, utiliza-se a taxa temporal padrão de 30 *frames* s<sup>-1</sup>, que é um padrão americano (BENETAZZO, 2006). A diferença da variação temporal da taxa de tempo do *frame* da câmeras foi de 0.333 segundos, esses valores valem, tanto para a câmera superior como para a câmera inferior. Os períodos analisados no trabalho foram de 0.5 até 1.4 segundos com uma taxa amostral de 4 a 5 *frames* por segundo, valor adequado para a frequência de Nyquits (GOMES, 2013).

$$dt \leq \frac{1}{2f_{max}} \leq \frac{1}{4} \quad (63)$$

Destaca-se que um fator importante para o processamento dos *frames*, no programa Ondômetro Óptico, é a taxa temporal e espacial das imagens em relação ao tempo e custo computacional. Quanto maior e melhor a resolução da imagem, maior será o custo computacional, e, conseqüentemente, maior será o tempo de duração do processamento.

A instalação de duas câmeras, para os experimentos do presente trabalho, devem ser fixas sem a necessidade de movimentos durante a filmagem, ou seja, o menor movimento possível da câmera. A melhor maneira é fixar as câmeras em um tripé ou uma haste fixa para que não ocorra um deslocamento brusco nas coordenadas reais e da imagem. No experimento do laboratório oceânico, foram fixadas as câmeras em uma haste.

Primeiramente, é importante observar os parâmetros geométricos da posição das duas câmeras. Logo, devem ser considerados os seguintes itens para um perfeito experimento:

- a sua altura em relação à inclinação da lente ao nível d'água, tanto no eixo horizontal e vertical para uma perfeita reconstrução geométrica.
- o ângulo de declinação deve ser igual a 0.
- a necessidade de conhecimento de parâmetros geométricos da imagem, como, por exemplo, a distância da régua até a câmera e a distância do batedor de ondas até a câmera. São parâmetros necessários para os futuros cálculos.

Segundo Cooley & Tukey(1965), a aplicação para a Transformada Rápida de Fourier das séries temporais se dá pelo número de imagens ( $N_{im}$ ) múltiplo da potência 2 para a sua adequação ao sistema que foi utilizado.

$$N_{im} = D_v V_{aq} = 2^n \quad (64)$$

Os termos desta equação são  $V_{aq}$  que é a taxa ou velocidade de aquisição do vídeo ( $frames.s^{-1}$ ), e  $D_v$  que é a duração dos vídeos na escala de tempo de segundos.

## 2.3 Processamento das imagens

As imagens foram separadas e convertidas de vídeo para *frame* através do programa Matlab. O processamento é feito de *frame a frame* individualmente. A principal ferramenta para análise é o comportamento espacial e temporal do brilho. Logo após essa análise, são obtidos os parâmetros do pixel, de *frame a frame*, que são os resultados dos valores de R (Red), G (Green) e B (*Blue*), como visto anteriormente. Os modelos de BCH e Luminância foram usados para representar o brilho do *frame* no presente trabalho.

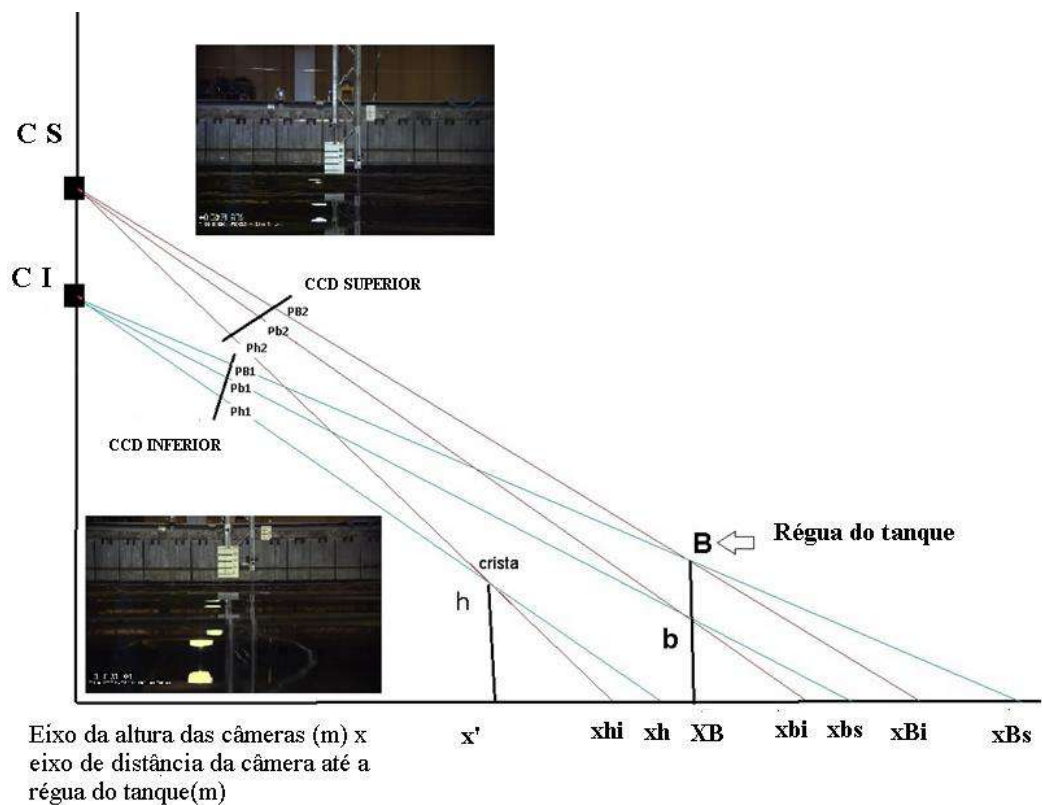


Figura 19: desenho esquemático da obtenção da altura da crista da onda através da semelhança de Triângulo. Obs: CCD superior e CCD inferior são as orientações da câmera; b é um ponto qualquer de intersecção do pixel; CI: câmera inferior; e CS: câmera superior. O b é o zero da marcação da régua e o B é o valor 200 na régua.

A Figura 19 mostra o procedimento adotado dos parâmetros das imagens tais como a posição da câmera até a régua, a altura da régua em relação ao nível médio da água e a distância da câmera até o batedor do tanque. Estes parâmetros são fundamentais para a análise das imagens processadas e depois para estimar a altura da mesma. Dos termos de nomenclatura da figura 19, tem-se:

$x'$  = a posição da crista da onda, em pixel, no eixo y da coordenada da imagem;

$x_{hi}$  = o feixe do CCD da câmera inferior que intercepta a crista da onda;

$x_{hs}$  = o feixe do CCD da câmera superior que intercepta a crista da onda;  $X_B$  = a

posição em pixel (eixo y das coordenadas da imagem) da régua;

$x_{bi}$  = o feixe do CCD da câmera inferior que intercepta o valor de 0 cm da régua;  $x_{bs}$  =

o feixe do CCD da câmera superior que intercepta o valor de 0 cm da régua;

## 2.4 Determinação da Altura da Crista da Onda

Para a obtenção da altura da onda, utiliza-se a semelhança de triângulo (Figura 19) e a estereoscopia.

Vale ressaltar que:

$H_i$  é altura da câmera inferior.

$H_s$  = altura da câmera superior.

$CI = H_i$

$CS = H_s$

Através da equação da reta, do ponto de  $(0, H_i)$  ao ponto  $(X_{hi}, 0)$ , tem-se:

$$Y = H_i - \frac{H_i}{X_{hi}} * X \quad (65)$$

Já na reta que irá do ponto  $(0, H_s)$  ao ponto  $(X_{hs}, 0)$ , apresenta-se a equação:

$$Y = H_s - \frac{H_s}{X_{hs}} * X \quad (66)$$

De acordo com a equação 65 e 66, são obtidas as coordenadas do ponto de cruzamento das duas retas em que  $Y=h$  e  $X=X_h$ ,

$$\text{Da equação 65, tem-se: } X = -\frac{(Y - H_i) * X_{hi}}{H_i} \quad (67)$$

$$\text{Usando a equação 66: } Y = \frac{(X_{hs} - X_{hi}) * H_s * H_i}{(X_{hs} * H_i - X_{hi} * H_s)}$$

Como resultado final através das simplificações obteve-se:

A posição da onda:

$$X_h = X \quad (68)$$

A Altura da onda

$$h = Y * 2 \quad (69)$$

## 2.3 Períodos da Onda

O brilho está em função da superfície d'água (inclinação). As componentes  $x$  e  $y$  da inclinação e  $\eta_x$  e  $\eta_y$ , possuem valores iguais de período de oscilação da elevação da superfície  $\eta$ . Sendo assim, a análise espectral das séries temporais do brilho pode favorecer as principais componentes da onda. Entretanto, o período de pico ( $Tp$ ) da onda se dá pela seguinte forma:

$$Tp = \frac{1}{f(\max(S(f)))} = \frac{1}{f(\max(B(f)))} \quad (70)$$

O termo  $B(f)$  é o espectro do brilho e  $S(f)$  é o espectro de frequência da série de elevações.

# CAPÍTULO 4

## Experimento no tanque oceânico (LabOceano) – Ondas reais

### 3.1 Introdução

O LabOceano é o laboratório do programa de Engenharia Naval e Oceânica (UFRJ/COOPE). Possui um tanque de ondas capaz de simular diversas condições em termos de hidrodinâmica no oceano, voltado principalmente para pesquisas *offshore*. Ele é composto por equipamentos de última geração e uma ótima infraestrutura, sendo reconhecido internacionalmente pelos trabalhos ali executados. Sua estrutura possibilita a prestação de serviços em hidrodinâmica experimental, computacional e modelagem numérica de sistemas navais e oceânicos, como também promove o desenvolvimento de inúmeros projetos de pesquisa.

O laboratório está há 14 (quatorze) anos em funcionamento, desenvolvendo inúmeros projetos como testes com semi-submersíveis, plataformas do tipo FPSO ancoradas, navio e balsas, e além de ensaios de instalação e operação de equipamentos submarinos.

O tanque oceânico é capaz de gerar ondas irregulares como: unimodal, bimodal e *jonswap*. Outrossim, gera ondas regulares que são monocromáticas e bicromáticas. A simulação dos testes, em inúmeras condições do ambiente, é eficiente para obter parâmetros reais da imagem. No experimento do presente trabalho, foram geradas ondas regulares.

### 3.2 Materiais e métodos

O tanque oceânico possui 40 (quarenta) metros de comprimento por 30 (trinta) metros de largura, 15 (quinze) metros de profundidade, bem como um poço central de 10 (dez) metros de profundidade e 5 (cinco) metros de diâmetro. Ainda possui duas praias, localizada no final do tanque a fim de amortizar a reflexão das ondas (Figura 20)

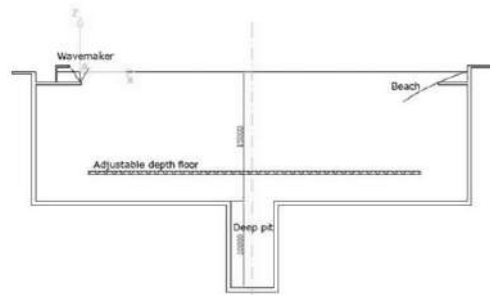
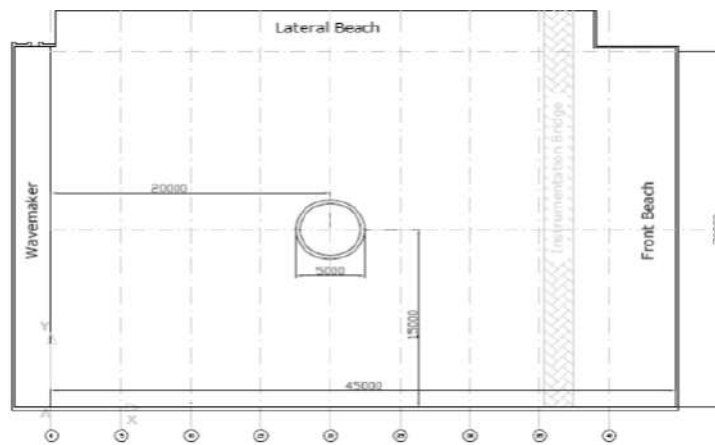


Figura 20: Descrição de larguras e comprimento do tanque oceânico (LabOceano)

O tanque é composto de 75 (setenta e cinco) batedores de ondas, contados da base do equipamento, com a altura imersa de 1,2m e 0,4 de largura. Esses batedores geram ondas regulares, multidirecionais, irregulares com e sem espalhamento, tendo período de pico máximo de 3,0 segundos e altura máxima significativa de 0,3 metros ( Figura 21).



Figura 21: Fotografia do tanque oceânico (LabOceano)

Durante o ensaio do experimento, foram instalados uma série de 32 *wave probes*, dois correntômetros no tanque principal e dois pares de câmeras ( Figura 22). Vale salientar que é de fundamental importância o uso dos *Waves Probes*, pois os resultados podem ser comparados para estimar a altura e o período da onda.

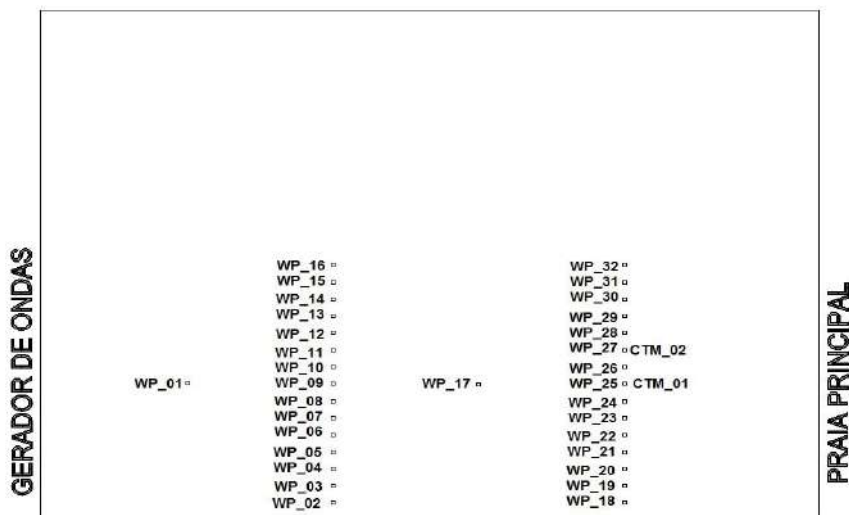


Figura 22: Distribuição dos *waves probes* ao longo do Tanque.



Na filmagem do experimento, foram utilizadas quatro câmeras com lentes Full HD, resolução de 1920x1080, com taxa de aquisição de 30 *frames* por segundo. A **Figura 23** mostra a posição das câmeras, conforme consta na

Tabela 1, e mais outras duas câmeras Standard Definition pertencentes à Petrobras, instaladas na borda do tanque a aproximadamente 25 m do gerador de ondas apenas com o fito de monitorar os testes. Essas duas câmeras não foram utilizadas na análise para estudos do presente projeto.

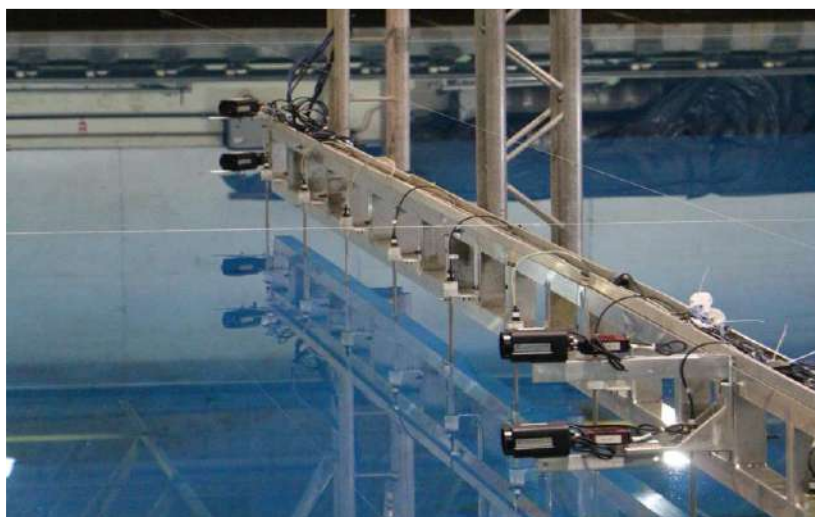


Figura 23: Imagem da posição das câmeras (LabOceano).

Tabela 1: Descrição da posição das câmeras no LabOceano.

Câmeras	X(mm)	Y(mm)	Z (Altura da câmera)
Cam1(central) superior	14710	7500	480
Cam3(central) inferior	14710	7500	240
Cam2 – 45° superior	14975	1500	480
Cam4 - 45° inferior	14975	1500	240

### 3.3 Processamento com as imagens

No processamento inicial, foram usadas as câmeras superiores e inferiores, frontais ao trem de onda. Essas ondas são modais e totalmente regulares. O programa Ondômetro Óptico, desenvolvido em linguagem Delphi ( Figura 234 e 25) conseguiu identificar através de uma linha amarela contínua a crista da onda. É importante ressaltar que a diferença de altura entre a câmera superior e inferior é de 24 metros ( **Figura 23** e Tabela 1), e há necessidade de sincronizar ambas imagens. Atualmente, o Ondômetro Óptico também foi desenvolvido na linguagem C ++ e consegue capturar essas cristas de ondas.

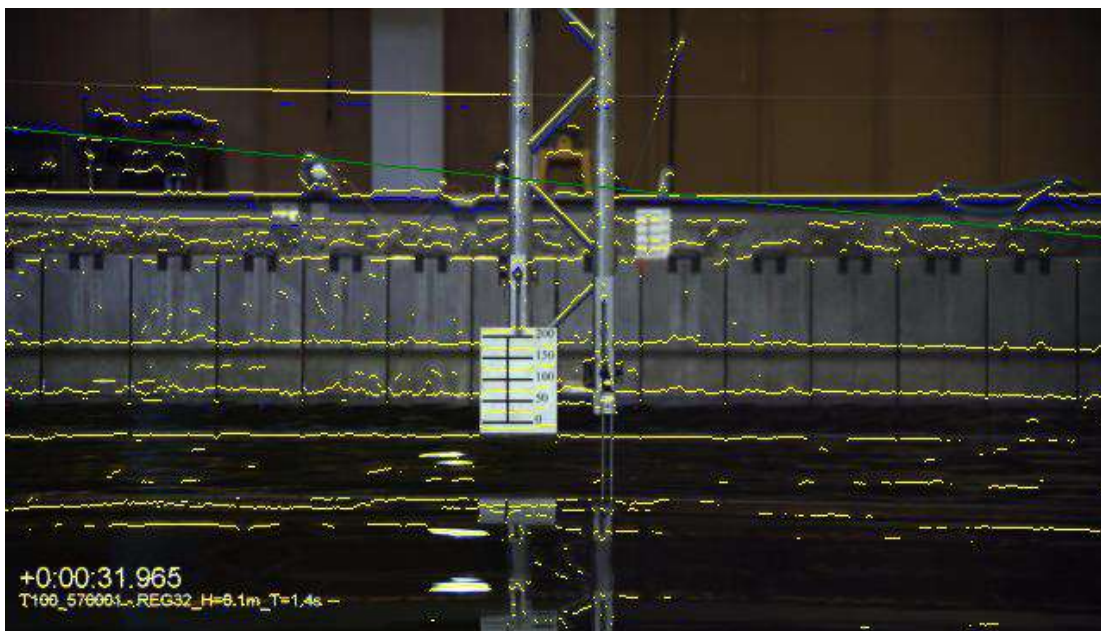


Figura 24: Imagem processada pelo Ondômetro Óptico (Câmera Superior).

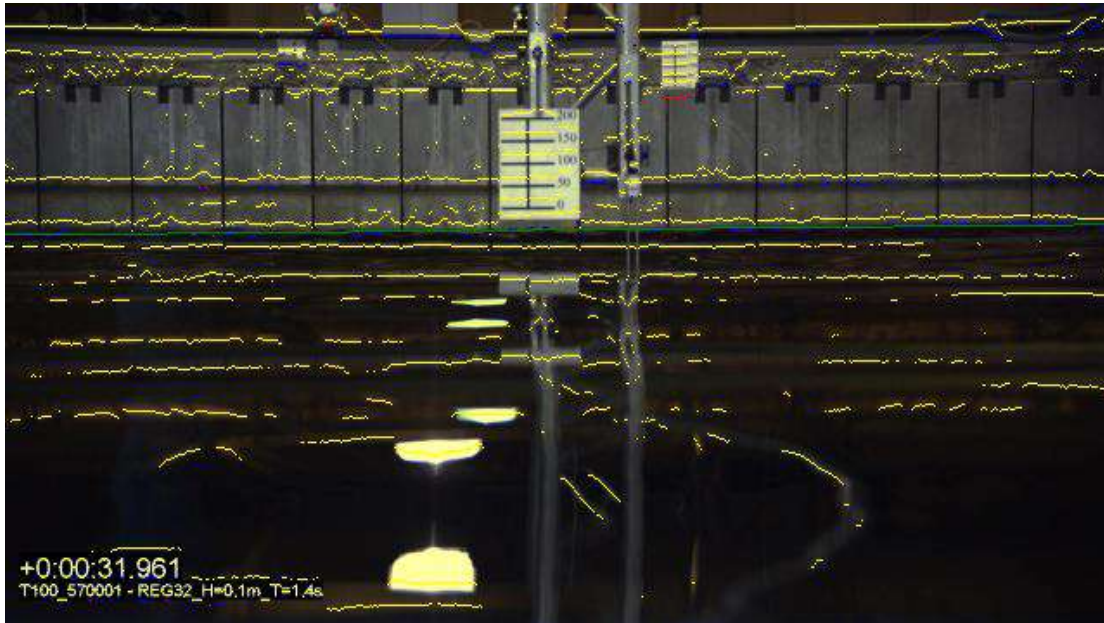


Figura 25: Imagem processada pelo Ondômetro Óptico (Câmera Inferior).

## CAPÍTULO 5

### Resultados e Discussão

Neste capítulo, discutir-se-ão os resultados obtidos pelo programa no que tange à altura e ao período da onda em casos regulares.

#### 4.1 Altura da onda

Primeiro, deve-se entender que são necessárias duas câmeras frontais às ondas, ou seja, perpendiculares às cristas das ondas para a obtenção da altura das mesmas. Essas câmeras devem estar, pelo menos, a 24 centímetros de altura uma da outra, e posteriormente, utilizar os cálculos anteriormente citados (Figura 19).

Nessas imagens (Figura 26), é importante escolher os pontos adequados para extração dos valores da linha em amarelo, escolhendo pontos fixos (pontos em vermelho). Esses pontos foram extraídos e os resultados comparados com os parâmetros configurados no de ondas a fim de observar a consistências dos dados. Em ambas as figuras, deve-se ter o cuidado de sincronizar corretamente as câmeras. No caso ora discutido, ocorreu a

sincronização através do cronômetro que aparece nas filmagens, apresentando uma defasagem de 0.004 milésimos de segundos de uma câmera para a outra, sendo normal e aceitável para obter o resultado.

Este experimento foi realizado somente com ondas monocromáticas se propagando em direção perpendicular ao eixo de visão da câmera (CCD). Os contrastes verticais mais acentuados no *frame* foram localizados na crista da onda. Sabe-se o período da onda e sua altura podemos calcular seu comprimento e esbeltez, pois são pontos importantes para a comparação dos resultados dos casos.

Entretanto, o comprimento da onda passa a ser o espaçamento entre as cristas subsequentes como as identificadas pelas linhas tracejadas em amarelo. Com o reconhecimento desses padrões, é possível reconhecer todas as cristas relevantes ao longo da sequência dos *frames*. De acordo com a Figura 27, a identificação da diferença de contraste é bem aplicado à identificação das cristas para uma onda monocromática no tanque oceânico. Desse modo, verifica-se que a maioria das cristas foram identificadas por todo *frame*, como nas câmeras superior e inferior.



Figura 26: Figura processada pelo programa (Câmera superior), com pontos fixos de extração dos dados em vermelho.

Na câmera superior (Figura 26) a região filmada está perfeita para análise que se localiza na parte mais distante do plano da imagem, favorecendo a perspectiva de captar as cristas melhor e os contrastes mais definidos. As ondas muito próximas a câmera inferior (Figura

27), não possuem contrastes suficientes, o que impede o reconhecimento dos padrões de crista com perfeição. A delimitação das cristas para inferências da altura de onda é feita em regiões mais distantes porque os contrastes são mais perceptíveis.

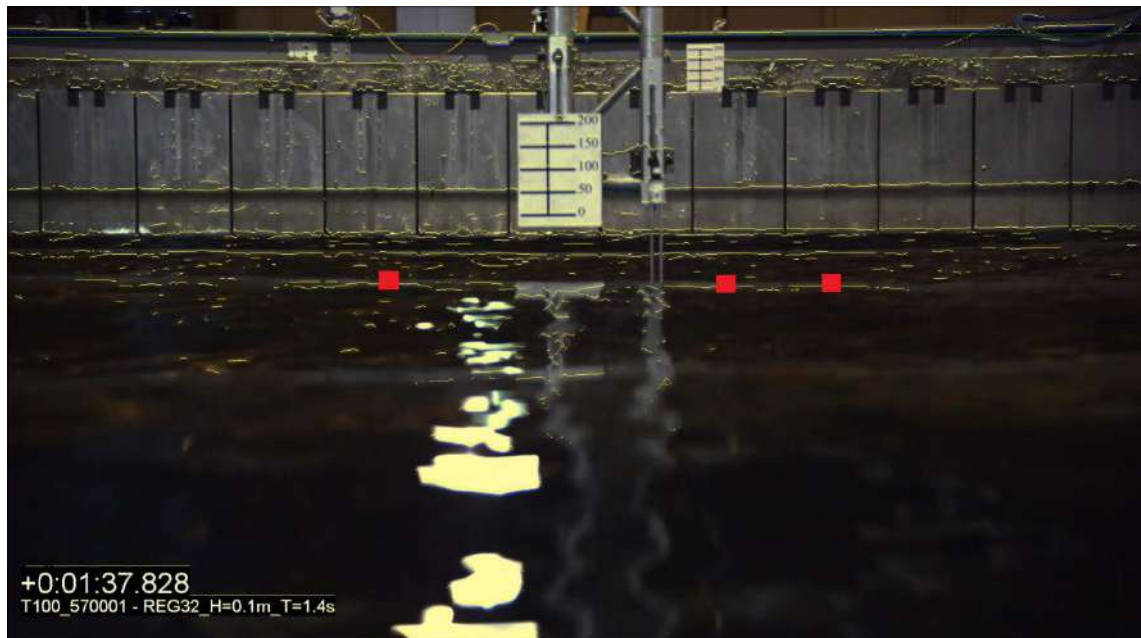


Figura 27: Figura processada pelo programa ondômetro óptico (câmera inferior) com pontos fixos de extração dos dados em vermelho.

A iluminação é um fator essencial para os resultados. Desta feita, na filmagem, não é favorável o ambiente muito claro com luzes extremamente fortes sobre a onda para não ocorrerem *spikes* (dados espúrios) no brilho da imagem, ou seja, a fim de evitar o reflexo na crista da onda, conforme mostra o frame da câmera inferior ( Figura 27).

Entretanto, um ambiente escuro também não é favorável, pois o programa não consegue detectar a crista da onda no frame perfeitamente. Logo, se faz necessário um ambiente com iluminação adequada (iluminação regular).

Outrossim, cabe observar que os pontos escolhidos foram fora da área de reflexo com o intuito não ter problemas com os resultados, conforme mencionado anteriormente.

Sabendo que o comprimento de onda (L) e a altura (H) apresentam a razão conhecida como esbeltez (*steepness da onda*), obter-se-á:

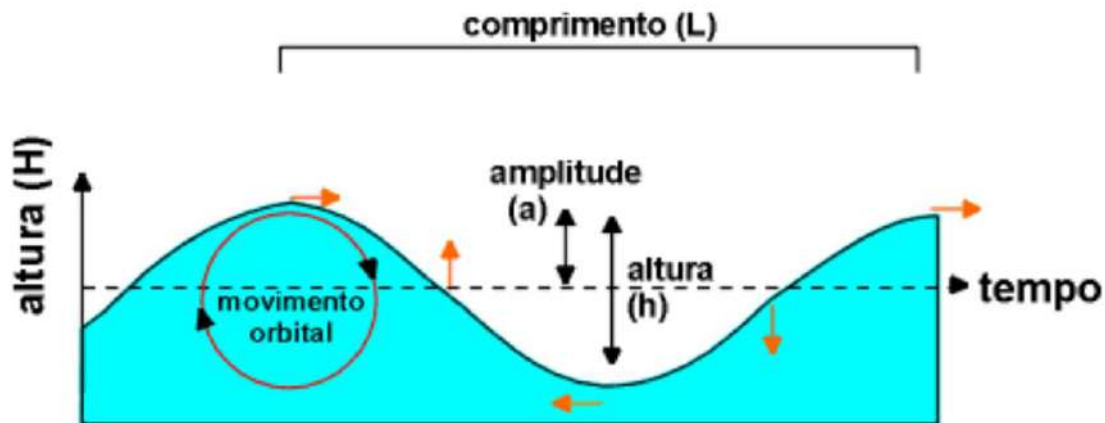


Figura 28: Figura sobre a esbeltez da onda.

Fonte: <http://www2.igc.usp.br/sedimentologia/arq/AulaSedI-Fluxo%209%20de%20junho.pdf>.

$$\delta = \frac{H}{L} \quad (71)$$

A partir disto, os resultados gerados (Tabela 2) estão sendo relacionados à esbeltez e a altura da onda. Foi observado que quanto maior a esbeltez da onda, menos satisfatórios são os valores obtidos pelo programa, isso é ilustrado, no caso 5, com o valor de 0.081 m de altura computado pelo modelo e esbeltez de 0.12. É considerado como um resultado menos satisfatório devido ao resultado da diferença de altura da onda gerada pelo modelo é de 0.015 m, com 11% de erro, e que obteve o maior registro entre os 10 casos. Nos demais casos, a diferença de altura não obteve tanta diferença, chegando ao resultado do tanque oceânico. É importante ressaltar que até 10% os valores são considerados satisfatórios e acima desse valor os resultados são menos satisfatórios.

Tabela 2: As colunas representam respectivamente: os diferentes casos gerados; a configuração de altura e período programadas no tanque oceânico; os valores de altura sacadas pelo processamento; e o valor da esbeltez das ondas geradas no batedor.

<b>Caso</b>	<b>Altura da onda H(metros) e T período (Segundos)</b>	<b>Altura da onda H(metros) gerada pelo Ondômetro</b>	<b>Esbeltez da onda</b>
1	H = 0.05 T = 0.6	H = 0.039	0.05
2	H = 0.05 T = 0.7	H = 0.060	0.04
3	H = 0.05 T = 1.0	H = 0.045	0.03
4	H = 0.05 T = 1.4	H = 0.054	0.02
5	H = 0.1 T = 0.6	H = 0.085	0.10
6	H = 0.1 T = 0.7	H = 0.090	0.09
7	H = 0.1 T = 0.8	H = 0.091	0.08
8	H = 0.1 T = 0.9	H = 0.094	0.07
9	H = 0.1 T = 1.0	H = 0.095	0.06
10	H = 0.1 T = 1.4	H = 0.096	0.04

Os melhores resultados, foram obtidos nos casos com menor esbeltez da onda, tendo, como exemplo, o caso 10, com ondas de 10 cm e período de 1.4s, com uma diferença de 0.004 cm de erro em relação ao valor real, gerado pelo LabOceano, ou seja, um erro de

0.4 % o que é aceitável devido à defasagem de milésimos de segundos da câmera inferior para a superior.

De um lado, no caso 4, atingiu-se um valor bem próximo em relação ao resultado da altura de onda, com esbeltez de 0.01 e período de 1.4 segundos. Por outro lado, no caso 5, apresentou-se uma esbeltez maior e altura de onda bem diferente do valor gerado pelo tanque oceânico.

Durante a análise, constatou-se que para a obtenção de um bom resultado depende de uma ótima resolução da imagem, boas condições de iluminação e sincronização em ambas as câmeras, visto que a ausência de qualidade gera resultados incompatíveis com valores reais. Por fim, vale ainda acrescentar que as ondas devem estar próximas às câmeras, pois quanto mais distante a câmera, mais ineficientes são os resultados obtidos no que tange à altura.

## 4.2 Análise Espectral do Brilho

No que concerne à análise do período de onda, é necessário estipular alguns pontos para análise. No presente caso, foram escolhidos os seis pontos em vermelho ao longo da linha amarela representada como a crista da onda (Figura 29). Diferente do item anterior, onde a altura da onda necessita de duas câmeras, para estimar o período, somente utiliza-se uma única câmera.



Figura 29: São seis pontos fixos no tanque oceânico a fim de extrair os dados de períodos.



A Figura 29 está relacionada ao caso 10 que obteve o resultado do período de onda adequado ao do LabOceano. Não se utilizou filtros para esta análise espectral e observou-se um bom comportamento da onda (erro de 3% em relação ao valor real) no período de 1.4 s e altura de 10 cm.

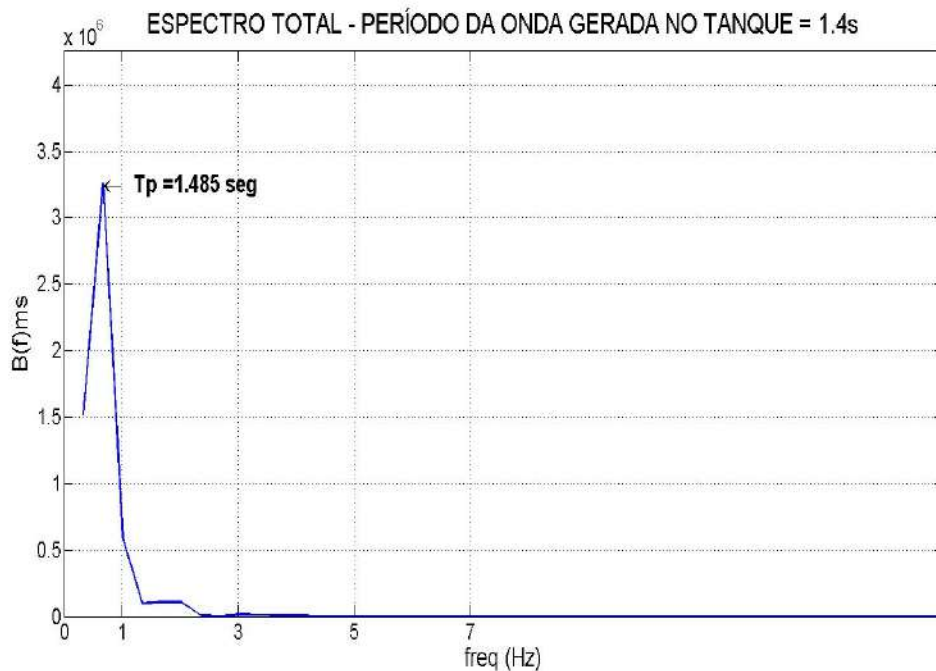


Figura 30: Análise espectral de todas as componentes do espectro do brilho, ms (milésimo de segundos) x Hz (Hertz).

No caso 10 (Figura 31), o período da onda gerada no tanque é de 1.4 segundos e altura de 10 cm. Logo, constatou-se que os seis pontos escolhidos na imagem não apresentaram variações, isto é, o período é próximo ao gerado pelo tanque oceânico, sendo o resultado do período obtido pelo ondômetro de 1.485s, com erro médio de 8%, resultado bom.

Cabe observar, nos gráficos acima, picos bem suaves de energia em frequências múltiplas (frequência da onda), devendo estar associados à presença de reflexos pontuais que é a iluminação excessiva dos refletores de luz na superfície da água.

Neste atributo que se refere ao sistema mecânico de geração de ondas que podem gerar ondas com frequências múltiplas a da oscilação principal, ou seja, faz com que outras

ondas se propaguem no tanque.

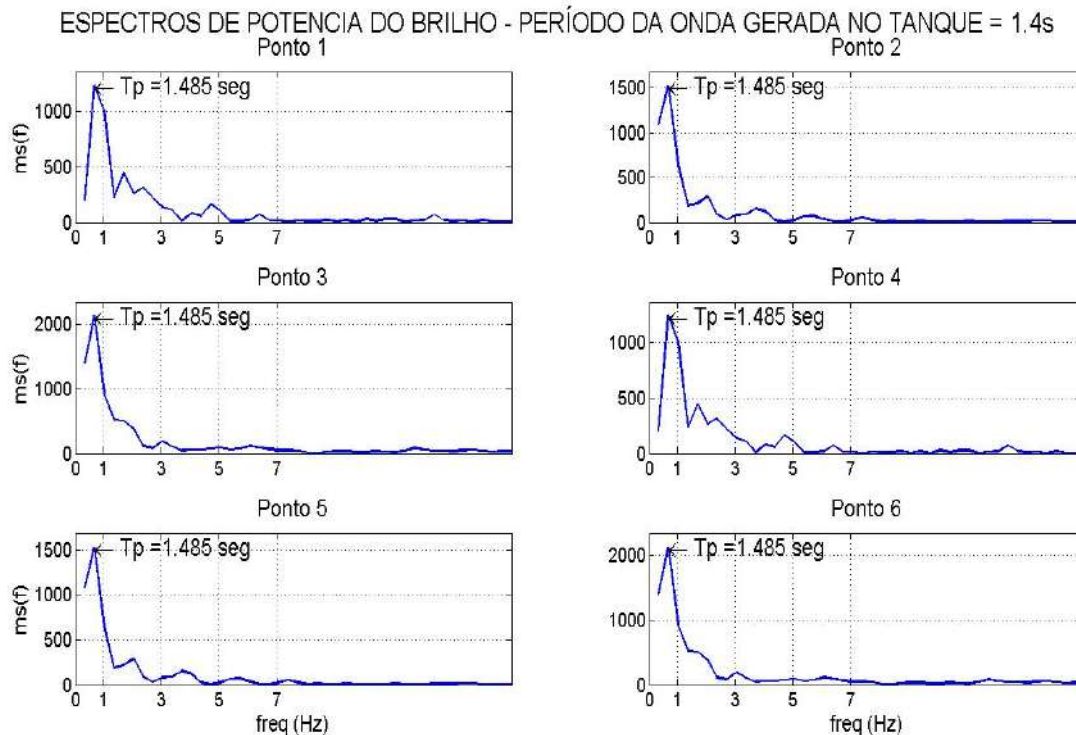


Figura 31: Gráficos contendo os valores do espectro do brilho (seis pontos) no frame da imagem analisada

Essas interferências são demonstradas em outro instante de tempo no *frame*, sendo similar ao item anterior (altura de 10 cm e período 1.4s), porém representado, no *frame*, o reflexo sobre a onda que se propaga (Figura 32), podendo, assim, gerar uma frequência harmônica de ordem superior. No entanto, uma feição da onda com *brilho* característico, como, por exemplo, uma crista apresenta deslocamento progressivo, ou seja, sempre em direção à propagação da onda. A região de reflexo, por outro lado, não se desloca apenas no sentido de propagação da onda, mas apresenta um padrão de oscilação. Este padrão possivelmente está associado ao pico espectral destacado no espectro da Figura 33, nos pontos 2 e 5.



Figura 32: Imagem demonstrando ponto de reflexo sobre a onda no tanque.

É visto acima uma grande distinção entre os dois picos de onda do espectro de brilho (Figura 32). A maior abscissa corresponde ao período gerado pelo LabOceano. Contudo, essas relações são representadas claramente pelo espectro de brilho com sua magnitude do sinal bem maior apresentado pelos pontos: 1, 3, 4 e 5, já nos pontos 5 e 2 são harmônico de ordem superior ( Figura 33).

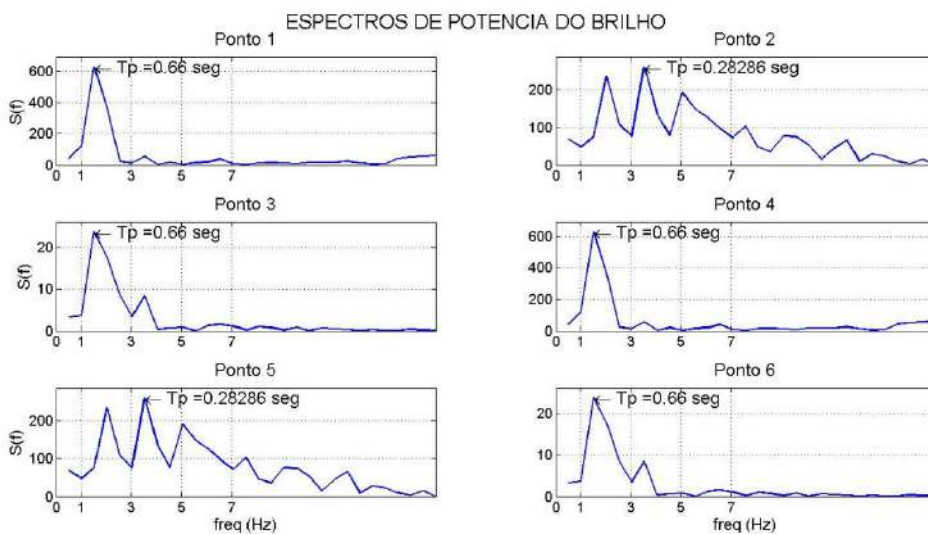


Figura 33: Análise espectral de cada ponto com período de 0.7 segundos.

Esses harmônicos de ordem superior (dados espúrios) da figura 33, são facilmente corrigidos fazendo uma média dos pontos ao longo de *frames* sucessivos (Figura 34).

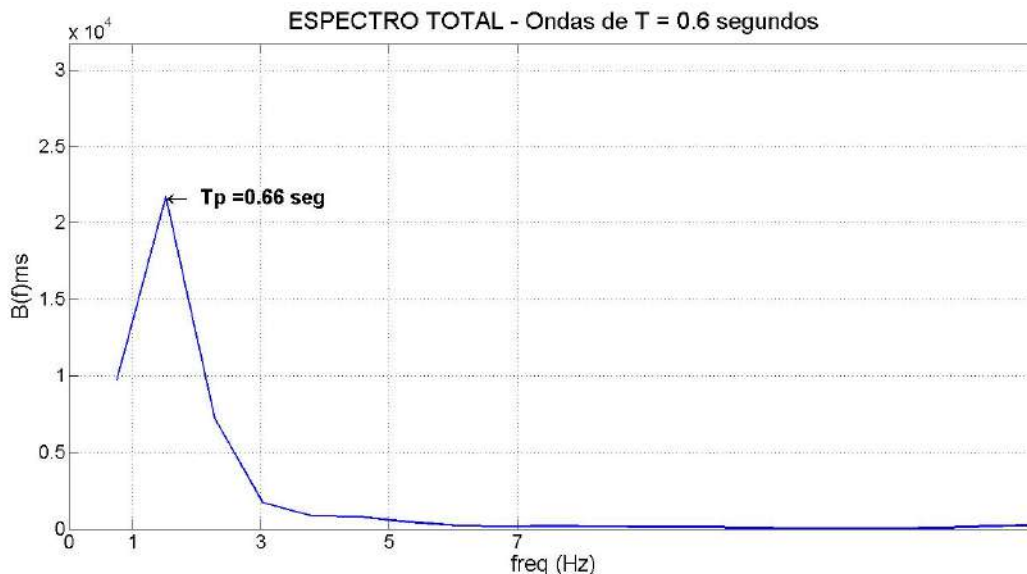


Figura 34: Espectro total resultante da média dos 75 espectros obtidos para o caso 2 - período de onda T de 0.7 segundo.  $T_p = 0.66$  segundos.

A média dos 75 espectros obtidos elimina ou reduz significativamente a participação relativa destes picos espúrios. Desta forma, o espectro total resultante da média apresenta a predominância clara do período da onda (Figura 34) em detrimento de outras frequências.

Como está demonstrado no gráfico, o experimento realizado no LabOceano gerou ondas regulares com período de 1.4 segundos e altura de 10 cm comparado aos resultados do programa Ondômetro Óptico (figura 34) e os valores de período gerados pelo tanque, ou seja, o  $T_{p1} = 1.4811$  segundos está com período próximo ao valor de ondas gerados no tanque, com um erro de desvio médio de 8% em relação ao valor real.

Esses harmônicos de ordem superior no frame são considerados como *spikes*, uma vez que esses dados são espúrios. É importante focalizar nos valores de energia do processamento e analisar a esbeltez de cada caso gerado da onda. No caso 10 (Tabela 4), a esbeltez da onda  $T_{p1}$  ( $T = 1.4$  s e  $H = 10$  cm) é de 0.04, sendo um valor baixo de esbeltez, resultando em um valor satisfatório do período da onda.

Vale enfatizar que o período de onda (T) foi determinado precisamente em todos os 10 casos discutidos, e que ambos os períodos foram computados tanto para

câmera superior ( $T_s$ ) e inferior ( $T_i$ ). Na tabela abaixo mostra melhor esses resultados.

Tabela 4: Valores de ondas gerados no tanque e pelo Ondômetro Óptico;  $T_s$  é o período para câmera superior e  $T_i$  é o período para câmera inferior.

<b>Caso</b>	<b>Período T da Onda Gerada (seg)</b>	<b>Período T(Segundos) Obtido no Processamento</b>	<b>Esbeltez da onda</b>
1	$T_s = 0.6$ $T_i = 0.6$	$T_s = 0.666$ $T_i = 0.699$	0.05
2	$T_s = 0.7$ $T_i = 0.7$	$T_s = 0.666$ $T_i = 0.665$	0.04
3	$T_s = 1.0$ $T_i = 1.0$	$T_s = 1.068$ $T_i = 1.200$	0.03
4	$T_s = 1.4$ $T_i = 1.4$	$T_s = 1.481$ $T_i = 1.485$	0.02
5	$T_s = 0.7$ $T_i = 0.7$	$T_s = 0.500$ $T_i = 0.542$	0.10
6	$T_s = 0.8$ $T_i = 0.8$	$T_s = 0.879$ $T_i = 0.889$	0.09
7	$T_s = 0.9$ $T_i = 0.9$	$T_s = 0.955$ $T_i = 0.975$	0.08
8	$T_s = 1.0$ $T_i = 1.0$	$T_s = 1.082$ $T_i = 1.102$	0.07
9	$T_s = 1.2$ $T_i = 1.2$	$T_s = 1.282$ $T_i = 1.288$	0.06
10	$T_s = 1.4$ $T_i = 1.4$	$T_s = 1.481$ $T_i = 1.489$	0.04

Na Tabela 4, é possível verificar que quanto maior à esbeltez (caso 5 e 1) da onda, menos satisfatórios são os valores de período obtidos pelo programa Ondômetro, onde há uma defasagem no resultado, com erro de 15%, ficando bem acima dos 10%

considerados como erro aceitável. Em ondas de menor esbeltez, obteve melhores resultados de período, vez que esses resultados ficam mais próximos aos valores do laboratório. Tal fato é explícito nos casos 10 e 4, com ondas de 10 cm e períodos 1.4 segundos, tendo o programa obtido resultados satisfatórios com uma diferença de 0.005 segundos de erro (0.5% de erro) em relação ao valor real gerado pelo Laboratório. Na câmera superior, os resultados foram melhores, do que a câmera inferior em ondas com período bem menores.

Logo, constatou-se que a câmera superior consegue captar melhor os valores de período de ondas, devido a melhor visualização, já a câmera inferior não consegue obter com eficiência as cristas, devido as ondas estarem mais próximas as câmeras e não têm uma resolução muito boa deformando a imagem e não conseguir obter o valor, visto isto, é interessante buscar ondas na câmera inferior mais distantes da lente.

No entanto, os resultados obtidos nos períodos de ondas demonstram que a técnica de análise espectral do brilho, em pontos fixos na imagem, é capaz de determinar e distinguir o período das ondas de modo bem semelhante ao período original.

## **CAPITULO 5**

### **Conclusão**

O experimento do LabOceano com ondas regulares é, sem dúvida, etapa fundamental para implementação de uma nova ferramenta de baixo custo.

Os resultados analisados permitem concluir que é possível identificar com precisão a altura das ondas, apenas com o emprego de duas câmeras perpendiculares às ondas. No que se refere ao período, é necessário somente uma única câmera, mas avaliou-se, nesse experimento, as duas câmeras (superior e inferior) e constatou-se que a câmera superior consegue captar melhor os valores de período do que a inferior.

Depois da compreensão e interpretação dos resultados, conclui-se que, os 10 casos analisados, tanto para período como para a altura da onda, superaram as expectativas e que a ferramenta consegue com precisão e eficiência a geração de resultados próximos ao valor gerado no tanque.

O programa conseguiu identificar a altura da onda através do espaçamento entre as

cristas. Assim, com o reconhecimento desses padrões, é possível identificar todas as cristas relevantes ao longo da sequência dos frames por meio da diferença de contraste. No tocante à altura da onda, conclui-se a necessidade da presença de duas câmeras para a mensuração das alturas. Outrossim, com ondas mais esbeltas (caso 1 e 5), a altura não foi tão acurada com um erro 0.015 m, o equivalente a 15% de erro, ficando distante da classificação como aceitável que é de 10% de erro, diferente de ondas menos esbeltas que tiveram resultados bem próximos e satisfatórios em relação aos obtidos no tanque oceânico com erro médio aproximado entre 2% a 8%. Já em ondas maiores e período maiores, o programa determina bem os resultados.

Nos casos 4 e 10, é possível observar a componente de onda bem detalhada com período igual do tanque e concluir que, em casos de ondas menos esbeltas, há a apresentação de valores precisos com os valores reais gerado pelo tanque. Em relação aos casos 1 e 5, com ondas de esbeltez maior, não se obteve um valor satisfatório, com um erro de desvio padrão de 0.158 s (caso 5), erro de 15%, ficando fora da classificação de 10 % como aceitável, comparado aos casos 4 e 10 que tiveram valores mais próximos, erro entre 1% a 8%, classificando como um ótimo resultado. Além do mais, é imprescindível distinguir os *spikes* indesejados das características particulares de cada situação entre os picos espectrais gerados por ondas de reflexos, escolhendo corretamente os pontos de saída dos dados, sem que haja reflexo.

Logo foi constatado que a câmera superior consegue captar melhor os valores de período de ondas do que a inferior, pois a câmera superior consegue visualizar melhor as ondas, já a câmera inferior com ondas muito próximas a resolução não é boa.

Por fim, vale enfatizar que os resultados foram bastante satisfatórios para o progresso do conhecimento e implementação desse novo sistema em locais que necessitam de monitoramento do mar, tanto para construções de engenharia como em emissários, portos e quaisquer construções próximas ao mar.

## **5.2 Considerações Finais**

É de suma importância a grande inovação realizada por meio de estudos das técnicas de imagens com o intuito de obter parâmetros oceanográficos (altura da onda e período), como também de aplicações na oceanografia. Já que com apenas duas imagens, consegue-se obter o período e a altura da onda. Além do mais, o processamento de

imagens é muito interessante, pois apresenta ricamente várias informações sobre as ondas e com baixo custo operacional, sem a necessidade de equipamentos caros para medição, bastando a utilização de apenas duas câmeras.

O projeto visa tão somente criar uma ferramenta de fácil e rápida implementação operacional, sem grandes custos financeiros e computacionais, ou seja, uma ferramenta simplificada e de fácil acesso. Outrossim, o programa não necessita de condições de iluminações restritas, utilizando apenas duas câmeras fixas, similares ao método de estereoscopia. Desta feita, usando estes procedimentos, constata-se que, de forma rápida e eficiente, determina-se a altura e período da onda para ondas monocromáticas regulares. Vale ressaltar que a iluminação local não era ideal devido a inúmeras fontes de iluminação no interior do tanque e objetos que influenciaram nos reflexos pontuais sobre as ondas, mas, ainda assim, os resultados foram satisfatórios.

É inegável que a técnica de processamento de imagens (estereoscopia) para parâmetros de ondas tem suma importância para superfície do oceano, pois permite a reconstrução da superfície da água para 3-D. Vale dizer que esta técnica não parece adequada totalmente para a o início da aplicação da estereoscopia, uma vez que se utiliza de duas câmeras com a mesma altura. Já no presente projeto foram usadas duas câmeras, entretanto, com alturas diferentes para a feitura da semelhança de triângulo, e, logo, inferir à altura.

Necessário se faz enfatizar que não fica descartado o uso de outras técnicas para a unificação e aquisição dos parâmetros da onda, podendo conseqüentemente ser usado para futuro estudos de pesquisa.

No que tange aos estudos relacionados aos casos de altura da onda, o programa se comportou de maneira adequada em relação aos dados do tanque, principalmente, em ondas com períodos e alturas maiores. O uso da técnica da semelhança de triângulo possibilitou esse resultado esperado de altura.

O período da onda obteve resultados satisfatórios em ondas monocromáticas e regulares, e a técnica conseguiu avaliar a presença de ondas e reflexos. Ainda em todos os casos, os períodos foram identificados de forma clara no espectro do brilho, mesmo com iluminação mais escura. Contudo, em alguns casos, em que apareceram brilhos no decorrer da filmagem, que não prejudicaram significativamente a aquisição dos resultados. Neste contexto, o aprimoramento da configuração dos pontos para análise foi fundamental para a extração dos resultados.



### 5.3 Futuros Trabalhos

Para futuros trabalhos, é interessante trabalhar com câmeras laterais, pois, no trabalho ora discutido, foram usadas câmeras frontais com foco na obtenção da altura e do período da onda. Assim, é interessante a realização deste estudo para o cálculo do período, da altura e até da direção da onda. Vale acrescentar que para as câmeras laterais é necessário um outro tipo de cálculo para estimar os valores de altura e período (Figura 35).

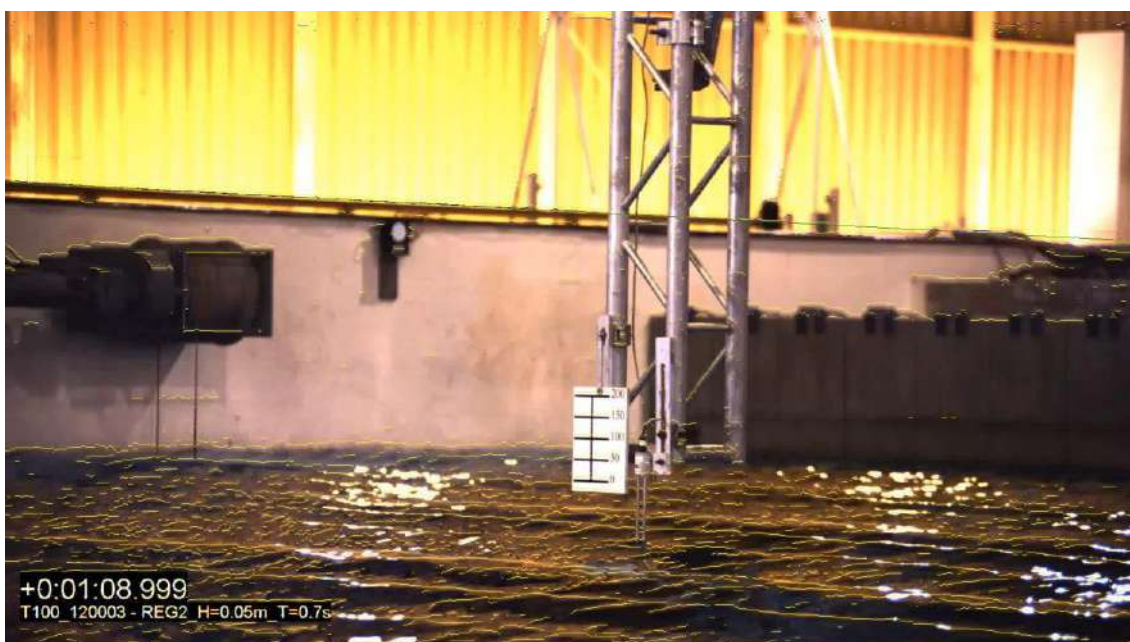


Figura 35: Filmagem da câmera lateral no LabOCeano.

Por fim, a figura 35 mostra que o programa consegue a identificação e o reconhecimento dessas ondas por meio de padrões de contraste para ondas monocromáticas do tanque oceânico, ou até para ondas bicromáticas. Verifica-se que as cristas foram identificadas em todo o tanque oceânico, podendo assim usar duas câmeras com pelo menos 2 metros de altura no mínimo.

Portanto, é importante cada vez mais adquirir mais conhecimento com o programa ondômetro óptico, pois o mesmo muito auxilia na obtenção de valores de período, direção, altura para câmeras frontais às ondas, como também na obtenção de resultados para câmeras laterais.

# Referências Bibliográficas

- BANNER, M., JONES, S. F., TRINDER, J. C., 1989, "Wavenumber Spectra of Short Gravity Waves", *Journal of Fluid Mechanics*, v. 198, pp. 321-344.
- BENETAZZO, A., 2006a, Measurement of water surface wave field using a non-intrusive method founded on a stereo-matching algorithm. Tese de Doutorado. Università Degli Studi di Padova, Padova, Itália.
- BENETAZZO, A., 2006b, "Measurement of Short Water Waves Using Stereo Matched Image Sequences", *Coastal Engineering*, v. 53, pp. 1013-1032.
- BENETAZZO, A., FEDELE, F., GALLEGGO, G., et al., 2012, "Offshore Stereo Measurements of Gravity Waves", *Coastal Engineering*, v. 64, pp. 127-138.
- BEZRYADIN, S., BOUROV, P., ILINI, D., 2007, "Brightness Calculation in Digital Image Processing Sergey". In: *International Symposium on Technologies for Digital Fulfillment*, pp., 10-15, Las Vegas, March.
- BLOCK, E. J., HARA, T., 1992, "Optical Measurements of Ripples Using Scanning Laser Slope Gauge. Part 11: Data Analysis and Interpretation from a Laboratory Wave Tank". In: *Optics of the Air-Sea Interface: Theory and Measurement*, v. 1749, Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Leland Estep, pp. 258-271.
- BURDIC, W., 1984, *Underwater Acoustic System Analysis*. 1 ed. New Jersey, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- COHEN, J. B., 2000, *Visual Color and Color Mixture: The Fundamental Color Space*. 1 ed. Illinois, University of Illinois Press
- COOLEY, J. W., TUKEY, J. W., 1965, "An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series", *Mathematics of Computation*, v. 19, pp. 297-301.
- COTE, L. J., DAVIES, J. O., MARKS, W., et al., 1960, "The directional spectrum of a wind generated sea as determined from data obtained by the Stereo Wave Observation Project", *Meteorological Papers*, v. 2, n. 6, 1-88.

- COX, C., Munk, W., 1954a, "Statistics of the Sea Surface Derived from Sun Glitter", Journal Marine Research, v.13, n. 2, pp. 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. v. 44, n.11, pp. 838-850.
- COX, C. 1958. "Measurements of Slopes of High-Frequency Wind Waves", Journal of Marine Research, v. 16, n.3, pp. 199-225.
- FAIRMAN. H. S., BRILL, M. H., HEMMENDINGER, H., 1996, "How the CIE 1931 Color- Matching Functions were Derived From Wright-Guild Data", COLOR Research and Application, v. 22, n. 1, pp. 11-23.
- FORRISTALL, G.Z., BARSTOW, S.F., KROGSTAD, et al., 2004, "Wave crest sensor intercomparison study: an overview of WACSYS". Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering-Transactions of the ASME, v. 126, n. 1, pp. 26-34.
- HASSELMANN, K, BARNETT, T. P., BOUWS, E., et al., 1973, Measurements of Wind- Wave Growth and Swell Decay During the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, v. 8, n.12.
- HOLTHUIJSEN, L. H., 1983a, "Stereophotography of ocean waves", Applied Ocean Research, v. 5, n 4., pp. 204-209.
- HOLTHUIJSEN, L. H., 1983b, "Observations of the directional distribution of ocean wave energy", Journal of Physical Oceanography, v. 13, pp. 816-827.
- HORN, B. K. P., 1977, "Understanding Image Intensities", Artificial Intelligence. v. 8, pp. 201- 231.
- HUGHES, B. A., GRANT, H. L., CHAPPEL, R. W., 1977, "A Fast Response Surface-Wave-Slope Meter and Measured Wind-Wave Moments", Deep Sea Research, v. 24, n. 12, pp. 1211-1233.
- HWANG, P. A., 1992, "Optical Measurements of the Structure of Short Water Waves and their Modulation by Surface Currents". in: Optics of the Air-Sea Interface:

- Theory and Measurement, v. 1749, Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Leland Estep, pp. 216-221.
- GOMES, H.R., AVILA, V., VIOLANTE, N.C., PINHO, U., PARENTE, C, E., NASCIMENTO, F., 2015, "Simple Techniques for Retrieval of Wind Wave Periods and Directions from Optical Images Sequences in Wave Tanks", Journal Coastal Research Paper, v.5
- JÄHNE, B., RIEMER, K. S., 1990, "Two-Dimensional Wave Number Spectra of Small-Scale Water Surface Waves". Journal of Geophysical Research, v. 95, n. C7, pp. 531-546.
- JÄHNE, B., 1993, Spatio-Temporal Image Processing – Theory and Scientific Applications. 1 ed. Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag.
- JÄHNE, B., KLINKE, J., WAAS, S, 1994, "Imaging of Short Ocean Wind Waves: A Critical Theoretical Review". Journal of the Optics Society of America, v.11, n. 8, pp. 2197–2209.
- JÄHNE, B., 2005, Digital Image Processing. 6 ed. Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag.
- KASEVICH, R. S, 1975, "Directional Wave Spectra from Daylight Scattering", Journal of Geophysical Research, v. 80, n. 33, pp. 4535-4541.
- KOHLSCHÜTTER, E., 1906, "Die Forschungsreise S. M. S. Planet, Band2. Stereo photo gramme trische Aufnahmen" Ann. Hydrographie, v. 34, 219.
- LAAS, W., 1905, "Photographische Messung der Meereswellen". Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, v. 49, 1889, 1937, 1976.
- LAAS, W. 1921. "Photographische Messung der Meereswellen." Veröffentlichungen Institut Meereskunde Reihe, v. A, n. 7.
- LANGE, P. A., JÄHNE, B., TSCHERSCH, J., et al., 1982, "Comparison Between an Amplitude-Measuring Wire and a Sople-Measuring Laser Wave Gauge", Review of Scientific Instruments. v. 53, n.5, pp. 651-655.
- LIU, J., 2007, Noise-Driven Concurrent Stereo Matching. Tese de Doutorado. The University of Auckland, Auckland, Nova Zelândia.

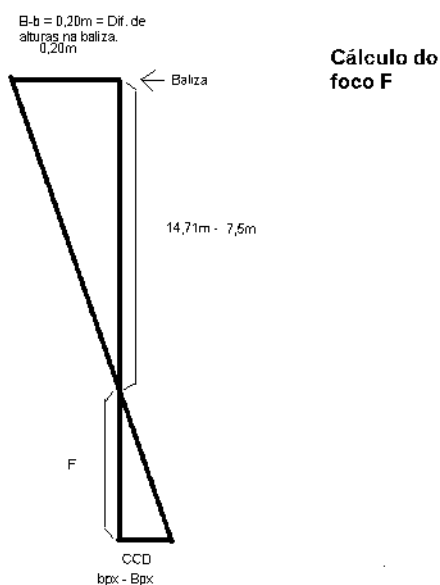
- MA, Y., KOSECKÁ, J., SOATTO, S., et al., 2001, *An Invitation to 3-D Vision From Images to Geometric Models*. 1 ed. New York, Springer-Verlag.
- MIRONOV, A. S., YUROVSKAYA, M. V., DULOV, V. A., et al., 2012, "Statistical Characterization of Short Wind Waves from Stereo Images of the Sea Surface", *Journal 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*, v. 11, pp. 271-283.
- PEPPERS, N. A., OSTREM, J. S., 1978, "Determination of Wave Slopes from Photographs of the Ocean Surface: a New Approach", *Applied Optics*, v. 17, n. 21, pp. 3450-3458.
- SANTEL, F., HEIPKE, C, KÖNNECKE, S., et al., 2002, "Image Sequence Matching for the Determination of Three-Dimensional Wave Surfaces". In: *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium*, pp. 596-600, Corfu, September.
- SANTEL, F., LINDER, W., HEIPKE, C., 2004, "Stereoscopic 3D-Image Analysis of Sea Surface". In: *Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium*, pp. 708-712, Istanbul, July.
- SCHUMACHER, A., 1939, *Stereophotogrammetrische Wellenaufnahmen*. In: *Wissenschaftliche Ergebnisse der Deutschen Atlantischen Expedition auf dem Forschungs - und Vermessungsschiff 'Meteor' 1925 - 1927. Ozeanographische Sonderuntersuchungen*, v. 7, p. 2., de Gruyter, Berlin.
- SHEMDIN, O. H., TRAN, H. M., WU, S. C., 1988, "Directional Measurements of Short Ocean Waves with Stereophotography", *Journal of Geophysical Research*, v. 93, n. C11, pp. 13891-13901.
- STILWELL, D. Jr, 1969, "Directional Energy Spectra of the Sea From Photographs", *Journal of Geophysical Research*, v. 74, n. 8, pp. 1974-1986.
- STILWELL, D. Jr., PILON, R. O., 1977, "Directional Spectra of Surface Waves From Photographs", *Journal of Geophysical Research*, v. 79, n. 9, pp. 1277-1284.

- TOBER, G., ANDERSON, R. C., SHEMDIN, O. H., 1973, "Laser Instrument for Detecting Water Ripple Slopes", *Applied Optics*, v. 12, n. 4, pp. 788-794.
- WANER, J. M., WU, C. H., 2006, "Automated Trinocular Stereo Imaging System for Three-dimensional Surface Wave Measurements." *Ocean Engineering*, v. 33, pp. 723-747.
- WEILL, A., GUERIN, C., HAUSER, D., et al., 2005, "Stereo-Photography Techniques". In: Hauser, D., Kahma, K., Krogstad, H. E., et al. (eds), *Measuring and Analysing the Directional Spectra of Ocean Waves*, 1 ed., chapter 4, Luxembourg, LU, European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research - COST.
- 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*, v. 15, pp. 70-73.
- WYSZECKI, G., STILES, W.S., 1967, *Color science: Concepts and methods, quantitative data and formulae*. 2 ed. New York, John Wiley & Sons.
- ZAPPA, C. J., BANNER, M. L., SCHULTZ, H., et al., 2008, "Retrieval of Short Ocean Waves Slope Using Polarimetric Imaging". *Measurement Science and Technology*, v. 19. 055503.

# APÊNDICE

## VERIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DO LOCAL E RECONSTRUÇÃO DA IMAGEM.

Consideramos como principal referência à altura do batedor de ondas que fica localizado ao fundo da imagem e a régua de marcação de nível, de acordo com a figura abaixo. Logo após procuramos achar o valor de conversão de pixel para grau, para cada câmera afim de usar nas formulas mostradas anteriores para achar a altura da onda. No caso, usamos a resolução de 1920 x 1080 e foi feita a conversão.



$b-B =$  diferença da marca do zero da baliza até a marca do 200.

$$b_{px} - B_{px} / 0,20 = F / 7,5$$

distância da câmera até o batedor = 14.71 m

distância da baliza até o batedor = 7.50 m

Distância da Câmara até a baliza:  $14,71 - 7,50 = 7,21$  m

Distância focal:  $F = (b_{px} - B_{px}) * 7,21 / 0,20_{px}$

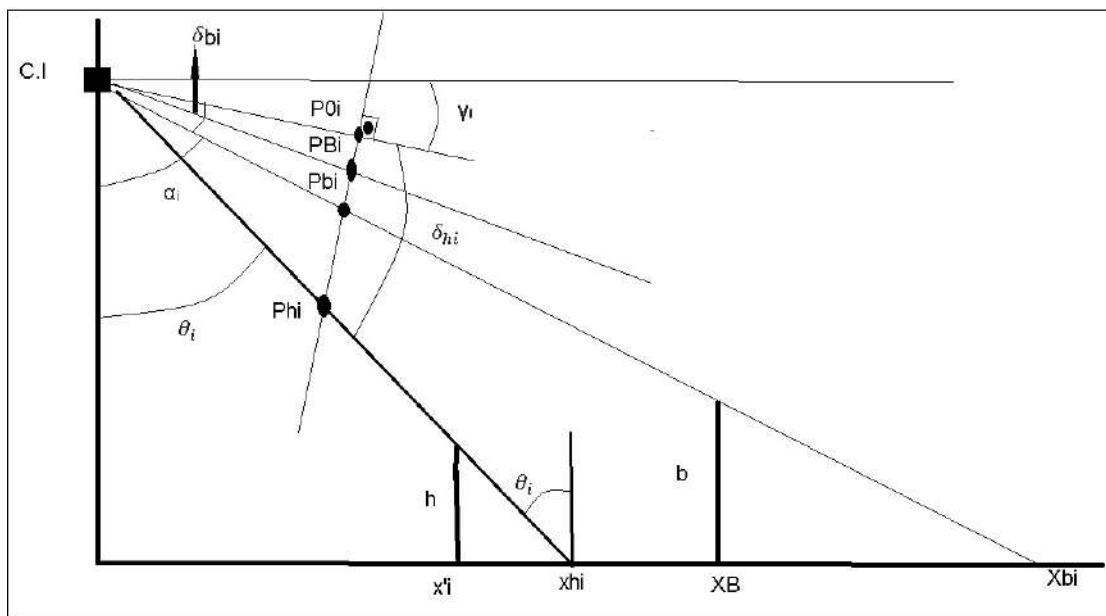
Distância Focal da câmara superior :

$F_s = (711 - 566) * 7,21 / 0,20 = 145 * 7,21 / 0,20 = 5227,25$

Distância Focal da câmara inferior :

$F_i = (355 - 200) * 7,21 / 0,20 = 155 * 7,21 / 0,20 = 5587,75$

O exemplo da figura abaixo, configura a câmara inferior o que equivale a câmara superior.



$$tg(\delta_{hi}) = \frac{Ph_i - P0_i}{F}$$

$$tg(\theta_i) = \frac{X_{hi}}{H_i}$$

$$\theta_i = 90 - (\delta_{hi} + \gamma_i)$$

$$X_{hi} = tg(\theta_i) * H_i$$

$X'_i = -[tg(\theta_i) * h/2] + X_{hi}$  equivale a posição da onda em pixel do eixo x.