UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

MARCELO GRINBERG

**Medição de superfície submersa de embarcação
com sistema ótico de precisão a laser**

São Paulo
2013

MARCELO GRINBERG

**Medição de superfície submersa de embarcação
com sistema ótico de precisão a laser**

Dissertação de mestrado apresentada à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Naval

Área de Concentração: Engenharia Naval

Orientador: Prof. Dr. André Bergsten
Mendes

São Paulo
2013

“Aos meus queridos pais, por terem me propiciado a base física, emocional e moral, que permitiu os meus estudos, e poder criar.”

"Eu vejo um relógio, mas não consigo imaginar o relojoeiro. A mente humana é incapaz de conceber as quatro dimensões, portanto, como pode a mente humana conceber D'us, diante de quem mil anos, e mil dimensões são como um ?"

I see a clock, but I cannot envision the clockmaker. The human mind is unable to conceive of the four dimensions, so how can it conceive of a God, before whom a thousand years and a thousand dimensions are as one?"

Albert Einstein

Agradecimentos

Aos estimados professores do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela calorosa acolhida, paciência e fonte de inspiração.

Ao professor doutor Toshi-Ichi Tachibana, pelo incentivo, e em conjunto com o professor doutor André Bergsten Mendes, professor doutor Mardel Conti, professor doutor Hernani Brinati, professor doutor Moyses Szajnbok, por todo o apoio e pelos sábios e preciosos ensinamentos e comentários.

A ANP, Agência Nacional de Petróleo, pelo apoio através do programa de bolsa de estudo de mestrado.

Ao professor doutor Oswaldo Horikawa pelo apoio e ensinamentos sobre metrologia ótica, que incentivou o desenvolvimento de sistema, e ao colega de classe de metrologia ótica David Telles Porras.

Resumo

A medição de superfícies através de sistemas óticos de precisão é aplicável em diversas áreas da engenharia naval e oceânica: levantamento de geometria de casco para a determinação da estabilidade estática de embarcações in loco, verificação de processos construtivos, recuperação de planos de linha originais perdidos, arqueologia naval, inspeção de cabos e estruturas submersas, planejamento de rota de mergulho, entre outras. Os dispositivos óticos de precisão disponíveis são de alto custo, e a necessidade de se desenvolver um dispositivo de baixo custo se faz presente. O propósito deste trabalho é a criação de metodologia de obtenção de superfície através de procedimento prático experimental. A varredura tridimensional de superfície é feita experimentalmente através da utilização de leitor tridimensional a laser. A contribuição deste trabalho é de promover um conceito teórico a uma prova experimental do conceito, utilizando-se de recursos da automação e robótica, e programação com linguagem e software aplicativo de baixo custo e largamente disponível.

Abstract

The surface measurement using precision optics is applicable in many areas of naval engineering: survey of hull geometry to determine the static stability of vessels on the spot, verification of construction processes, recovery of lost original hull plans, naval archeology, inspection of underwater structures and cables, route planning diving, among others. The precision optical devices available are expensive, and the need to develop a low-cost device is present. The purpose of this work is to create a methodology for obtaining surfaces through practical experimental procedure. The three-dimensional scan surface is made experimentally by using three-dimensional laser reader. The contribution of this work is to promote a theoretical concept to an experimental proof of concept, using the resources of automation and robotics, and software programming language and application of low-cost and widely available.

Sumário

1	Introdução.....	1
2	Contribuição.....	5
3	Caracterização e aplicação do método de verificação de estabilidade estática de embarcações fluviais.....	7
4	Proposta de metodologia de identificação da superfície submersa do casco necessária para avaliação de estabilidade estática de embarcações.....	8
4.1	Obtenção do plano de linhas através de leitor tridimensional a laser	8
4.1.1	Princípio da triangulação	9
4.1.2	Dispositivos comercializados que utilizam princípio da triangulação	10
4.2	Aplicação experimental do princípio do leitor tridimensional a laser	14
4.3	Construção do dispositivo experimental.....	19
4.3.1	Subsistema: leitor tridimensional a laser	20
4.3.2	Subsistema: conjunto microcontrolado	22
4.3.3	Subsistema: controle principal.....	25
4.3.4	Conexões elétricas	26
4.3.5	Conexão elétrica do servo motor	27
4.4	Funcionamento do dispositivo experimental	29
4.5	Software do dispositivo experimental.....	31
4.5.1	Software embarcado.....	32
4.5.2	Software aplicativo em Matlab®	46
4.6	Instalação inicial (“setup”)	67

4.6.1	Calibração da câmera.....	67
4.7	Metodologia de utilização do dispositivo experimental.....	73
5	Resultados experimentais.....	76
5.1	Experimento 1a: leitura de uma superfície plana inclinada em relação ao plano de leitura	76
5.2	Experimento 1b: leitura de uma superfície plana inclinada em relação ao plano de leitura com redução do passo de varredura e aumento da faixa de varredura.....	79
5.3	Experimento 2a: leitura de uma quina de caixa	81
5.4	Experimento 2b: leitura de uma quina de caixa com incremento do número de paradas verticais e horizontais, e aumento da faixa de varredura do laser	82
5.5	Experimento 3: abordagem quantitativa dos erros de medição: leitura de lateral de caixa	85
6	Aplicação prática do leitor tridimensional a laser em embarcações.....	88
6.1	Construção da curva de estabilidade estática com dados instrumentados ..	89
6.2	Utilização de leitor tridimensional a laser em meio aquoso.....	90
7	Conclusão.....	92
8	Proposta de trabalhos futuros.....	95
	Referências	97
	APÊNDICE A: Altura metacêntrica.....	99
	APÊNDICE B: Prova de Inclinação	103
	APÊNDICE C: Prova de Inclinação alternativa.....	108

APÊNDICE D: Proposta de tratamento de sinistros decorrentes de emborcamento

112

Índice de figuras

Figura 1 - Movimento do leitor tridimensional a laser em relação ao casco	9
Figura 2 - Princípio da triangularização	10
Figura 3 - Proposta comercial solicitada a 2G Robotics	11
Figura 4 - Movimento da cabeça de leitura em relação ao objeto	15
Figura 5 - Cabeça de leitura movimentada pela correia dentada, acionada pelo motor de passo vertical	16
Figura 6 - Movimento da cabeça de leitura e do plano de varredura do laser	17
Figura 7 - Subsistemas do dispositivo experimental	19
Figura 8 - Cabeça de leitura	20
Figura 9 - Leitor tridimensional a laser	21
Figura 10 - Conjunto microcontrolado	22
Figura 11 - Placa de prototipagem	23
Figura 12 - Placa microcontrolada principal	25
Figura 13 - Placa controladora de motor de passo.....	25
Figura 14 - Conexões elétricas principais	26
Figura 15 - Conexões do servo motor	27
Figura 16 - Placa controladora de motor de passo.....	28
Figura 17 - Conexões DIR e STEP aos pinos digitais da placa microcontrolada principal.....	29
Figura 18 - Diagrama do funcionamento do leitor tridimensional a laser.....	31
Figura 19 - Componentes do software embarcado	32
Figura 20 - Sub-rotinas do loop principal do software embarcado	33
Figura 21 - Funções do software embarcado	33
Figura 22 - Código fonte: definição de variáveis do software embarcado (parte 1)...	34

Figura 23 - Código fonte: definição de variáveis do software embarcado (parte 2)...	35
Figura 24 - Código fonte: configuração do software embarcado	35
Figura 25 - Sub-rotinas do software embarcado no contexto do processo gerenciado pelo software aplicativo principal.....	36
Figura 26 - Código fonte: sub-rotina de posicionamento do servo motor conforme ajuste do potenciômetro	38
Figura 27 - Código fonte: sub-rotina de posicionamento do servo motor conforme valor do ângulo enviado pelo software aplicativo	39
Figura 28 - Código fonte: sub-rotina de movimento vertical da cabeça de leitura	39
Figura 29 - Código fonte: sub-rotina de movimento horizontal do conjunto trilho vertical onde está a cabeça de leitura	40
Figura 30 - Código fonte: sub-rotina de retorno vertical da cabeça de leitura à posição original	41
Figura 31 - Código fonte: sub-rotina de retorno horizontal do conjunto 'trilho vertical - cabeça de leitura'	42
Figura 32 - Código fonte: função de rotação do motor de passo vertical	44
Figura 33 - Código fonte: função de rotação do motor de passo horizontal	46
Figura 34 - Código fonte: inicialização do programa principal 'arduinoservo.m'	49
Figura 35 - Código fonte: leitura do ângulo inicial e final pelo programa 'arduinoservo.m'	50
Figura 36 - Código fonte: loop de varredura do laser do programa 'arduinoservo.m'.	51
Figura 37 - Código fonte do programa 'arduinoservo.m': obtenção da imagem do objeto alvo	52
Figura 38 - Efeito das características superficiais do objeto na reflexão do laser	54

Figura 39 - Código fonte do programa 'prova0909.m': parâmetros do ponto do laser e correção da imagem.....	54
Figura 40 - Código fonte do 'prova0909.m': separação dos canais e filtro da imagem	55
Figura 41 - Distância do ponto da imagem ao ponto do laser em coordenadas (R,G,B)	58
Figura 42 - Código fonte do 'prova0909.m': pesquisa e identificação do ponto do laser na imagem.....	59
Figura 43 - Calibração da câmera: matriz K	60
Figura 44 - Sistema referencial da câmera: distância focal e centro da imagem	61
Figura 45 - Código fonte do 'prova0909.m': cálculo da profundidade	61
Figura 46 - Determinação do ângulo γ	62
Figura 47 - Ângulo β	63
Figura 48 - Determinação da profundidade h	64
Figura 49 - Sistema referencial de coordenadas.....	65
Figura 50 - Modelo de tratamento de pixels da câmera "pinhole camera model"	68
Figura 51 - Centro focal da câmera.....	68
Figura 52 - Padrão quadriculado da folha de calibração	69
Figura 53 - Calibração da câmera com o uso de folhas quadriculadas	69
Figura 54 - Interface gráfica do software de calibração da câmera	70
Figura 55 - Rotina de extração das bordas da imagem.....	70
Figura 56 - Algoritmo de correção da distorção da lente	71
Figura 57 - Parâmetros intrínsecos da câmera	72
Figura 58 - Processo de inicialização do leitor tridimensional a laser	74
Figura 59 - Processo de aquisição de pontos com leitor tridimensional a laser	75

Figura 60 - Leitura de superfície de objeto plano inclinado	77
Figura 61 - Disposição dos pontos válidos no espaço: leitura de superfície plana com baixa resolução de pontos	78
Figura 62 - Identificação do ponto no reflexo do laser.....	79
Figura 63 - Disposição dos pontos válidos no espaço: leitura de superfície plana com elevada resolução de pontos.....	80
Figura 64 - Leitura de quina de caixa	81
Figura 65 - Disposição dos pontos válidos no espaço: leitura de uma quina de caixa com baixa resolução de pontos.....	82
Figura 66 - Disposição dos pontos válidos no espaço: leitura de uma quina de caixa com elevada resolução de pontos.....	84
Figura 67 - Vista superior da quina	85
Figura 68 - Leitura de lateral de caixa	85
Figura 69 - Disposição dos pontos válidos no espaço: leitura de uma lateral de caixa	87
Figura 70 - Esquema de montagem do scanner tridimensional a laser.....	89
Figura 71 - Barras "BOSCH" (DIRECT INDUSTRY, 2012)	89
Figura 72 – Lei de Snell	91
Figura 73 - Metacentro transversal M.....	99
Figura 74 - Localização do metacentro transversal M.....	100
Figura 75 - Disposição de massas – Prova de Inclinação	104
Figura 76 - Diagrama de forças e momentos da prova de inclinação clássica.....	105
Figura 77 - Medição dos desvios por meio de tubo em "U"	106
Figura 78 - Localização da caixa d'água na embarcação	108
Figura 79 - Superfície da água dentro da caixa d'água	109

Figura 80 - Diagrama de forças e momentos da prova de inclinação proposta	110
Figura 81 - Dados de entrada da prova de inclinação proposta	111
Figura 82 - Componentes do sistema em foco	113
Figura 83 - Diagrama da metodologia sugerida para tratamento de sinistros	114
Figura 84 - Análise de Conformidade com Normam2 no instante do evento	116
Figura 85 - Tabela de Variáveis	117
Figura 86 - Critério de estabilidade para embarcações da área1 (DELEGACIA DE PORTOS E COSTAS, 2012)	118
Figura 87 - Braço de Endireitamento GZ para ângulo $\Theta_1 > \Theta$	120
Figura 88: Redução da área sob a curva de estabilidade devido à elevação do centro de gravidade.....	121
Figura 89 - Área vélica	122

Índice de tabelas

Tabela 1 – Empresas fornecedoras de leitores tridimensionais a laser	14
Tabela 2 - Endereços dos pinos das placas controladoras de motor de passo	28
Tabela 3 - Definição das variáveis de controle dos motores de passo.....	34
Tabela 4 - Funcionalidades das sub-rotinas do software embarcado	36
Tabela 5 - Argumentos de entrada das funções.....	43
Tabela 6 - Experimentos realizados com leitor tridimensional a laser.....	76

1 Introdução

O foco deste trabalho é desenvolver e aplicar uma metodologia de medição da geometria de superfície por procedimento prático, e validar o procedimento prático através de embasamento experimental. O dispositivo experimental construído disponibiliza os dados de superfície obtidos, que correspondem a um conjunto de coordenadas tridimensionais de pontos. Medição de superfície submersa de embarcação, por exemplo, é necessária para resgatar, in loco, o plano de linhas de uma embarcação que se deseje avaliar a estabilidade estática. No caso, assume-se que os dados referentes ao centro de gravidade estejam disponíveis e que foram obtidos por procedimento tradicional sugerido pela prova de inclinação, e que foge ao escopo deste trabalho.

O trabalho compreende no capítulo 2 a metodologia utilizada na concepção do dispositivo experimental sob a ótica do VSM, ou “Viable System Model”. O capítulo 3 caracteriza a importância da leitura de superfície submersa de embarcação in loco para avaliação de estabilidade estática. O capítulo 4 descreve o dispositivo experimental de leitura de superfície construído, seus principais componentes, conexões elétricas, funcionamento do hardware, software embarcado e software aplicativo, instalação inicial, calibração, e modo de utilização. O capítulo 5 apresenta provas experimentais, com variação na resolução ou número de pontos obtidos, e medição do erro de leitura. O capítulo 6 sugere a construção de um dispositivo real focado na leitura de superfície submersa de embarcações para avaliação da estabilidade estática. O capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho, e o capítulo 8 sugere proposta de trabalhos futuros.

A medição de superfícies submersas através de sistemas óticos de precisão é aplicável em diversas áreas da engenharia naval e oceânica: levantamento de geometria de casco para a determinação da estabilidade estática de embarcações in loco, verificação de processos construtivos, recuperação de planos de linha originais perdidos, arqueologia naval, inspeção de cabos e estruturas submersas, planejamento de rota de mergulho, entre outras. Os dispositivos óticos de precisão disponíveis são de alto custo, e a necessidade de se desenvolver um dispositivo de baixo custo se faz presente.

Como exemplo da utilidade da medição de superfícies em cascos submersos, parte do levantamento de estabilidade estática de embarcações sinistradas por emborcamento exige o conhecimento do volume submerso. Historicamente, os sinistros ocorridos com embarcações fluviais causados por emborcamento indicam a possibilidade de ocorrências por falta de estabilidade estática (AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS, 2012), ou não cumprimento dos critérios previstos na NORMAM (DIRETORIA DE PORTOS E COSTAS, 2012). A criação de norma e procedimento de verificação in loco de estabilidade estática de embarcações, utilizando leitura ótica de superfície submersa, pode reduzir de forma proativa a ocorrência de sinistros, e consequentemente, contribuir para a salvaguarda da vida e aumentar a segurança da navegação fluvial. A medição de superfície submersa in loco viabiliza a avaliação da estabilidade estática da embarcação. Ou seja, a criação deste procedimento de fiscalização demanda uma metodologia de obtenção de superfície tridimensional do casco, através de procedimento prático.

O propósito deste trabalho é a criação e utilização experimental de dispositivo de medição de superfície. A varredura tridimensional de superfície é feita

experimentalmente através da utilização de leitor tridimensional a laser, composto basicamente do conjunto composto de feixe de laser e câmera digital, denominado de cabeça de leitura, e dispositivo de movimento deste conjunto (cabeça de leitura) ao longo de dois eixos de coordenadas cartesianas, para determinação da superfície exposta ao dispositivo.

O princípio de funcionamento do leitor tridimensional a laser pode ser demonstrado experimentalmente em escala reduzida, através da utilização de um emissor de laser fixo a um servo-motor, uma câmera, trilhos de curso acionados por motores de passo, placa controladora analógico-digital com software programável embarcado, e laptop com software aplicativo fundamentado no princípio da triangulação e tratamento de arquivos de imagens.

A adaptação de embarcações fluviais, como a construção de pavimentos superiores, pode aumentar o risco de emborcamento, dado que a elevação do centro de gravidade reduz o braço de endireitamento GZ , e consequentemente, a área sob a curva de estabilidade estática necessária para restaurar a posição da embarcação após a mesma ter absorvido energia cinética do meio ambiente.

A obtenção da geometria de superfície submersa da embarcação in loco por sistema ótico de precisão a laser viabiliza a estimativa da altura do centro de carena (KB), e do raio metacêntrico transversal (BM). Com os dados disponíveis por prova de inclinação, que fornece o valor da altura do centro de gravidade (KG) para cada ângulo de inclinação, pode-se obter a curva de estabilidade estática da embarcação in loco. A verificação dos critérios de estabilidade previstos na NORMAM, utilizando a curva de estabilidade estática como instrumento principal para avaliar a estabilidade da embarcação, e a comparação dos dados obtidos com a documentação técnica de projeto atualizada da embarcação resolve o problema da

ausência de procedimento de medição in loco de estabilidade estática de embarcações.

O trabalho sugere (como apêndice) proposta de tratamento de sinistros decorrentes de emborcamento, devido à perda da capacidade da embarcação de restaurar a posição de estabilidade após sofrer ação externa de ventos, por exemplo.

2 Contribuição

Este trabalho detalha o desenvolvimento de dispositivo ótico de precisão a laser destinado a leitura de superfícies utilizando recursos da automação e robótica, e programação com linguagem e software aplicativo de baixo custo e largamente disponível.

A cibernética, que estuda a comunicação e controle de máquinas ou dispositivos, pode ser utilizada para promover conceitos teóricos a provas experimentais. Este trabalho promove o conceito teórico da triangulação, a uma prova experimental, que é a obtenção de geometria de superfícies. A concepção deste processo se baseou no modelo VSM ou '*Viable System Model*' (BEER, 1972). Neste modelo devemos caracterizar cinco instâncias necessárias para a construção de um sistema viável, que no caso refere-se a uma prova experimental, ou simplesmente denominada de sistema-em-foco, descrito abaixo:

1. Operações: contempla todas as atividades do sistema-em-foco. O leitor tridimensional a laser construído possui funções, por exemplo, move a cabeça de leitura na direção vertical, horizontal, tira foto de imagem, move o laser, entre outras;
2. Coordenação: contempla as rotinas e regras que trazem estabilidade ao sistema. O software embarcado na placa microcontrolada e o software aplicativo regem a comunicação com o hardware, e desempenham sub-rotinas de cada função do sistema-em-foco;
3. Controle e auditoria: provê monitoramento das atividades ou funções. A presença de laços (ou '*loops*') no software aplicativo, e respectivas condições monitoram as funções;

4. Inteligência: congrega interações entre o sistema e o ambiente, para desempenho. Há uma interface com o usuário disponibilizada pelo software aplicativo que assume o papel de interação entre o sistema e o meio;
5. Estratégias: corresponde a identidade do sistema-em-foco. No caso, o sistema-em-foco é destinado à leitura de superfícies dispostas no raio de visão do feixe do laser e da câmera.

É importante organizar a construção de um dispositivo prático experimental sob a ótica do VSM, e atender as cinco instâncias.

3 Caracterização e aplicação do método de verificação de estabilidade estática de embarcações fluviais

A aplicação das normas atuais da Autoridade Marítima (NORMAM) visa proteger as embarcações contra emborcamento. O levantamento das normas atuais existentes sugere que uma vistoria in loco da embarcação possa ser adicionada ao conjunto de procedimentos atuais, e consequentemente contribuir como atuação proativa das autoridades no sentido de agregar maior segurança às embarcações abordadas durante sua operação.

O procedimento de vistoria in loco foi inspirado no exemplo criado pelas autoridades de trânsito, que abordam veículos em operação e procedem com a medição dos índices de álcool dos motoristas condutores dos veículos.

Sugere-se que a autoridade marítima aborde uma embarcação no meio fluvial, e através de instrumentação de baixo custo, proceda com a medição da geometria do casco submerso sem a necessidade de retirar a embarcação da sua rota, e com os dados adicionais de prova de inclinação, determine as curvas de estabilidade estática da embarcação.

A leitura da superfície submersa do casco permite a estimativa da geometria do plano de linhas, que para diferentes condições de calado, viabiliza a construção da curva de estabilidade estática, a partir do cálculo estimado de altura do centro de carena (KB) e do raio metacêntrico transversal BM. Estes são elementos úteis para avaliação da eventual mudança de casco de obras vivas e distribuição dos pesos a bordo.

4 Proposta de metodologia de identificação da superfície submersa do casco necessária para avaliação de estabilidade estática de embarcações

4.1 Obtenção do plano de linhas através de leitor tridimensional a laser

O levantamento do volume submerso do casco é fundamental para a construção das curvas hidrostáticas, que disponibilizam a posição do centro de carena B para as várias condições de calado.

Assumindo que o casco a ser estudado é simétrico em relação a sua linha longitudinal de centro, pretende-se efetuar a sua varredura tridimensional através de uso de dispositivo transdutor que percorra a longitudinal do casco, baliza a baliza, e que seja solidário ao casco. Evita-se assim que os movimentos oscilatórios da embarcação interfiram na medição, quando abordada in loco. Pode-se sugerir que esta estrutura seja montada sobre a borda livre. O leitor tridimensional percorre a longitudinal, e a cada baliza, efetua o movimento de descida, sobre um trilho vertical. Após percorrer toda a longitudinal, o leitor disponibiliza o arquivo tridimensional dos pontos da superfície do casco para o dado calado. A geração da superfície permite o cálculo do volume submerso. A partir do volume submerso do casco obtido pela instrumentação, pode-se compará-lo com os dados registrados na Capitania dos Portos.

Figura 1 - Movimento do leitor tridimensional a laser em relação ao casco

Há vários dispositivos que permitem esta varredura. É importante comparar estes dispositivos quanto à precisão, facilidade de manuseio, e custo. Pretende-se aqui criar um conjunto de instrumentação que seja acessível para a sua ampla utilização por parte das autoridades marítimas.

4.1.1 Princípio da triangulação

A varredura tridimensional do casco a laser baseia-se no princípio da triangulação:

Dados três pontos no espaço tridimensional, conhecida a distância (d) entre dois pontos, os ângulos formados entre a reta que contém estes dois pontos ao terceiro ponto, forma-se um triângulo.

De forma análoga, dados três pontos definidos pela posição de saída de um feixe a laser (primeiro ponto), afastada a uma distância (d) da lente de uma câmera tipo “webcam” posicionada sobre o segundo ponto, e conhecidos os ângulos formados entre a base que contém a saída do feixe a laser e a lente da câmera ao terceiro ponto, gerado pela reflexão da luz laser no objeto de estudo, pode-se calcular por trigonometria a distância desta base ao terceiro ponto.

Esta distância corresponde a profundidade (h) do ponto do objeto de estudo, necessária para recompor a imagem tridimensional do objeto, a partir da sua imagem bidimensional capturada pela câmera.

Figura 2 - Princípio da triangulação

A profundidade h será dada por:

$$h = \frac{d * \tan \alpha}{1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \beta}}$$

4.1.2 Dispositivos comercializados que utilizam princípio da triangulação

Os dispositivos de leitura de superfície através de instrumento ótico de precisão a laser, e que geralmente utilizam o princípio da triangulação, são conhecidos na bibliografia internacional como “3D laser scanners”, e na bibliografia nacional como leitores tridimensionais a laser.

Diversas empresas comercializam leitores tridimensionais a laser. Para avaliar o custo de um leitor tridimensional a laser, a empresa ‘2G Robotics®’ foi consultada. Localizada em Waterloo, Ontario, Canada e fundada em 2007, a 2G Robotics® Inc. oferece a solução de leitor a laser com ênfase particular em sistemas submersos.

O link URL de acesso a empresa 2G Robotics® é <http://www.2grobotics.com/>

Os modelos ULS-100 e ULS-500 foram cotados. Estes modelos são ideais para medidas de alta precisão em ambiente submerso. Os valores propostos incluíam a aquisição do modelo, com software aplicativo, e cabo submersível de 25 metros e são preços modalidade FOB, os custos de envio e frete são por conta do cliente. Por proteção de confidencialidade e direitos comerciais do fornecedor, os valores não são expostos neste trabalho.

Figura 3 - Proposta comercial solicitada a 2G Robotics

O modelo ULS-100 emite um feixe de laser verde em direção à superfície do objeto alvo, e ao longo desta linha, 480 medidas são capturadas. Estas leituras são pontos no espaço tridimensional representando um único perfil geométrico ao longo da linha do laser. Através da rotação da linha do laser, uma série de perfis geométricos adjacentes é capturada, e constrói-se um modelo de nuvem de pontos tridimensionais da superfície a ser lida.

Utilizando esta nuvem de pontos, medidas e volumes podem ser extraídos e os dados desejados então obtidos. Para que os dados capturados apresentem qualidade, ou seja, o número de pontos espúrios minimizado, os seguintes três requerimentos devem ser atendidos:

i) Turgidez da água:

Sendo um sistema ótico, o sensor utiliza a luz que deve ser refletida pela superfície do objeto alvo. A presença de lodo ou poluentes pode bloquear o feixe de laser, impedindo tanto que o mesmo atinja a superfície alvo como a reflexão da luz sobre a superfície seja impedida pelo lodo de atingir o sensor.

ii) Estabilidade do sensor durante a leitura

Ao posicionar perfis adjacentes para a geração da nuvem de pontos, o sensor assume que está estacionário ou solidário em relação ao objeto ou superfície alvo. Qualquer movimento do sensor irá contaminar os dados lidos, gerando um número elevado de pontos espúrios.

iii) Iluminação ambiente

O sensor dos sistemas ULS identifica a reflexão da luz do laser. Outras fontes de luz que não sejam a do laser podem confundir o sensor e resultar em ruído nos dados adquiridos.

Segue a figura do modelo ULS-100, designado para medidas de curta distância, em áreas de varredura distantes de 10 centímetros a 1 metro do sensor:

Modelo ULS-100

Segue a figura do modelo ULS-500, designado a leitura de superfícies em áreas de varredura distantes de 1 metro a 10 metros, ideal para inspeções em cascos e propulsores.

Modelo ULS-500

Segue a referência de outras empresas que comercializam leitores tridimensionais a laser portáteis, para consulta de custos. Estes modelos não trabalham em ambiente submerso, salvo comentado de forma explícita nas informações de produto das empresas abaixo citadas. Os nomes nos produtos aqui mencionados são protegidos por direitos autorais da empresa fabricante, e os endereços URL podem não estar atualizados quando acessados pelo leitor(a) deste trabalho:

Empresa	Modelos comercializados	Endereço URL
Nikon®	LC15Dx laser scanner LC60Dx laser scanner LC50Cx laser scanner ModelMaker KScan	http://www.nikonmetrology.com/en_EU/Products/Laser-Scanning
Cyberware®	Head & Face Color 3D Scanner (Model PX)	http://www.cyberware.com/products/scanners/index.html
Revware®	Skyron Laser	http://www.revware.net/products/
CreaForm®	Go Scan3D Handy Scan3D Metra Scan3D	http://www.creaform3d.com/pt
Kreon®	Aquilon	http://www.kreon3d.com/our-3d-scanners/
Laser Design Inc®	Artec Eva®	http://www.laserdesign.com/products/scanners_and_software/portable_laser_scanners/

Tabela 1 – Empresas fornecedoras de leitores tridimensionais a laser

4.2 Aplicação experimental do princípio do leitor tridimensional a laser

Foi construído um dispositivo experimental idealizado para a aplicação prática do leitor tridimensional a laser, aqui referenciado como ‘scanner 3D a laser’, destinado a obter a superfície tridimensional do objeto em estudo.

O conjunto se baseia na movimentação de uma base na qual é fixada uma câmera e um emissor de laser. A lente da câmera e o ponto de saída do feixe de laser são separados de uma distância fixa (d) conhecida. Esta base se movimenta no plano ortogonal à base do objeto a ser lido.

Figura 4 - Movimento da cabeça de leitura em relação ao objeto

O conjunto constituído por uma câmera e um diodo de laser, conhecido como cabeça de leitura, forma a base do triângulo de comprimento (d) correspondente a distância entre o centro focal da câmera e o ponto a partir do qual o feixe de laser é emitido.

A cabeça de leitura se move verticalmente ao longo de um trilho vertical. Este trilho vertical, por sua vez, se move horizontalmente ao longo de um trilho horizontal fixo. A cabeça de leitura foi fixa a um cabeçote que se movimenta por correia ao longo do trilho. O movimento do conjunto 'trilho vertical – cabeça de leitura' se move horizontalmente, compondo assim o plano de leitura. Cada correia é acionada por motor de passo, que ao girar, traciona a correia dentada.

Figura 5 - Cabeça de leitura movimentada pela correia dentada, acionada pelo motor de passo vertical

Na cabeça de leitura, o movimento de varredura do feixe de laser é acionado por servo motor. O eixo do servo motor está posicionado transversalmente ao feixe de laser, que faz a varredura no plano que contém o centro focal da câmera. Este plano de varredura do laser é sempre paralelo ao plano da base, onde será colocado o objeto, conforme Figura 6.

Figura 6 - Movimento da cabeça de leitura e do plano de varredura do laser

O sistema mecânico motor é composto por dois motores de passo, cada qual proporciona o movimento ao longo de cada trilho, vertical e horizontal, e um servo motor, que proporciona a varredura do feixe de laser.

O acionamento dos motores demanda um sistema de controle, constituído por uma placa microcontrolada principal, e duas placas controladoras de motor de passo (SPARK ELECTRONICS, 2012). A placa microcontrolada disponibiliza portas analógicas e digitais e conexão via USB ao computador. As duas placas

controladoras de motor de passo estão conectadas às portas digitais da placa microcontrolada principal.

A alimentação da placa microcontrolada principal é feita através da conexão via USB, que proporciona 5 volts de tensão. As placas controladoras de motor de passo são alimentadas por fonte de 12 volts independente. O movimento do motor de passo é efetuado através do acionamento manual de um potenciômetro.

O computador executa o programa aplicativo em Matlab®, que envia e recebe caracteres para a porta serial COM3 da USB. A placa microcontrolada principal executa um programa embarcado escrito em linguagem C, que também envia e recebe caracteres para a mesma porta serial COM3.

O subsistema constituído pela cabeça de leitura, e conjunto eletromecânico de trilhos e motores, acrescido da base de apoio é denominado de leitor tridimensional a laser.

O subsistema constituído pela placa microcontrolada principal, placas controladoras de motor de passo, cabo de conexão USB e fonte de alimentação 12 volts, placa de prototipagem, cabos de conexões e potenciômetro é denominado de conjunto microcontrolado.

O subsistema de computador, sistema operacional, software aplicativo Matlab® e respectivos programas é denominado de sistema de controle principal. O programa escrito em Matlab® conduz a dinâmica do sistema.

O sistema de controle principal envia comandos para o conjunto microcontrolado, adquire trata as imagens obtidas pela câmera conectada à porta USB, e calcula a profundidade. O conjunto microcontrolado aciona os motores de passo e servo motor do leitor tridimensional a laser.

A cabeça de leitura se move verticalmente e horizontalmente ao longo de um trilho vertical acoplado a um trilho horizontal. Logo, a cabeça de leitura move-se no plano ortogonal a base do dispositivo, onde é colocado o objeto alvo. A medida de profundidade (h) é determinada pelo tratamento da imagem obtida a cada parada da cabeça de leitura, localiza na imagem da câmera o reflexo do ponto do laser do objeto alvo, e cada ponto tridimensional é armazenado em uma matriz. No final do processo de leitura, estes pontos tridimensionais são plotados. O número de paradas verticais e horizontais é definido via software aplicativo escrito em Matlab®.

4.3 Construção do dispositivo experimental

O sistema do leitor tridimensional a laser é basicamente constituído por três subsistemas, a citar: controle principal, conjunto microcontrolado, e leitor tridimensional a laser propriamente dito.

Figura 7 - Subsistemas do dispositivo experimental

A comunicação entre o subsistema “controle principal” e o subsistema “controle principal” é realizada através da porta serial COM3. O controle principal executa um software aplicativo, e através desta porta serial, envia comandos para o conjunto

microcontrolado, que executa a rotina desejada, escrita em C. Conforme a rotina executada, o acionamento eletromecânico é realizado no leitor tridimensional a laser, dotado de servo-motor e motores de passo.

4.3.1 Subsistema: leitor tridimensional a laser

O leitor tridimensional a laser é composto por uma base, dois conjuntos de trilhos, e cabeça de leitura. O trilho possui uma correia dentada, acionada por roldana fixada ao eixo de um motor de passo, que quando acionado, movimenta a correia e o cabeçote. A cabeça de leitura foi montada sobre o cabeçote, conforme Figura 8. O mecanismo foi extraído de impressora matricial.

Figura 8 - Cabeça de leitura

Os principais componentes são:

- trilho vertical: permite o movimento vertical da cabeça de leitura através do acionamento de motor de passo.
- trilho horizontal: permite o movimento horizontal do conjunto trilho vertical - cabeça de leitura, através do acionamento de motor de passo.

- base de fixação: suporta o conjunto de trilhos e a superfície do objeto alvo. O trilho horizontal é fixo à base de fixação.
- objeto-alvo: visível para o feixe a laser e para a câmera é atingido pelo ponto luminoso do laser e a fotografia da câmera é obtida para aquele ponto. Para cada posição do trilho vertical sobre o trilho horizontal, a cabeça de leitura se move de cima para baixo a distâncias discretas, e a fotografia do ponto luminoso do laser sobre a superfície do objeto é obtida, e processada, obtendo-se as profundidades “h” desejadas. Constrói-se assim uma matriz de coordenadas tridimensionais representativa da geometria no espaço físico tridimensional que contém a superfície do objeto.

Figura 9 - Leitor tridimensional a laser

A cabeça de leitura está afixada ao cabeçote do trilho vertical, e este por sua vez está afixado ao cabeçote do trilho horizontal.

4.3.2 Subsistema: conjunto microcontrolado

O conjunto microcontrolado é composto por uma placa microcontrolada principal, e placas controladoras de motor de passo conectadas a uma placa de prototipagem.

Figura 10 - Conjunto microcontrolado

A placa de prototipagem é a base onde são feitas todas as conexões elétricas do conjunto microcontrolado.

Figura 11 - Placa de prototipagem

A placa de prototipagem é composta de orifícios dispostos matricialmente, em colunas numeradas de 1 a 65, linhas referenciadas pelas letras sequenciais de A até J, e linhas dos polos positivos e negativos. Nestes orifícios são conectados os pinos dos conectores elétricos. A placa apresenta dois conjuntos independentes de orifícios, referenciados pelas linhas de A até E, e de F até J, separados pelo sulco central da placa. Ao longo de cada conjunto de orifícios percorre uma linha destinada ao polo negativo (cor azul) e pólo positivo (cor vermelha). Logo, há dois pares de alimentação na placa, ou linhas, para cada conjunto independente de orifícios de conexão.

Cada coluna de conexões numeradas de 1 a 65 é curto circuitada, e isolada eletricamente da linha adjacente. A utilização desta placa de prototipagem é fundamental para a conexão dos terminais elétricos necessários para o dispositivo.

Uma base composta pela placa de prototipagem e conjunto microcontrolado foi utilizada, de forma que todas as conexões necessárias para o conjunto microcontrolado estejam próximas da placa de prototipagem.

A placa microcontrolada principal foi fixa a uma pequena altura da base, permitindo isolamento elétrico dos terminais sob a placa de circuito impresso. A esta mesma base foi fixada uma placa de prototipagem, próxima o suficiente para permitir a conexão entre os terminais analógicos e digitais. Sobre a placa de prototipagem foram instalados os dois controladores de motor de passo.

A placa microcontrolada principal escolhida foi a *Arduino Uno* (ARDUINO, 2012), devido ao seu baixo custo de aquisição, disponibilidade de ferramentas de programação e respectiva biblioteca de funções, facilidade de uso, e software não proprietário. Composta de portas de entrada e saída, portas analógicas e digitais, atende as funções necessárias para o controle do leitor tridimensional a laser. Apresenta 14 portas digitais (PIN1, PIN2,..., até PIN14) e 6 portas analógicas (A0, A1, ..., até A5), opera a uma voltagem de até 5 volts, e utiliza microcontrolador ATmega328. Pode ser alimentada diretamente pela conexão USB ou por fonte de alimentação externa. Cada pino digital pode ser utilizado como entrada ou saída, conforme definido na programação de software embarcado. As portas analógicas, numeradas de A0 a A5, disponibiliza 10 bits de resolução, ou seja, 1024 valores diferentes, dentro da faixa de tensão de 0 a 5 volts.

O software embarcado desta placa pode ser programado em C através de uma interface gráfica ao usuário, e é transmitido à placa via USB e armazenado na memória tipo 'flash' da placa (32 KB).

Figura 12 - Placa microcontrolada principal

A placas controladoras de motores de passo escolhidas foram modelo 'Easy Driver', fabricadas pela Spark Eletronics®, também de baixo custo, e facilidade de uso. São compatíveis com a placa microcontrolada principal Arduino Uno, com saída digital de pulso de 0 to 5 volts. Permite conectar motores de passo bipolares de 4 fios. Os motores de passo bipolares.

Figura 13 - Placa controladora de motor de passo

4.3.3 Subsistema: controle principal

O controle principal é composto pelo computador (dotado de porta USB alimentada com 5 volts), sistema operacional Windows 7, software aplicativo Matlab®, e

programas de computador escritos em Matlab®. A execução dos programas em Matlab® conduz o todo o fluxo de informações trocadas com o conjunto microcontrolado e o acionamento dos componentes de hardware do leitor tridimensional a laser, a citar: câmera, servo motor do laser, e motores de passo do movimento horizontal e vertical da cabeça de leitura.

O programa principal controla todo o processo através de interface com o usuário, e a partir de valores atribuídos a variáveis do programa, tais como número de paradas horizontais e verticais, ângulo inicial e final da varredura do laser, passo angular da varredura, tratamento das imagens adquiridas pela câmera a cada parada da cabeça de leitura, localização do ponto do laser na imagem adquirida, cálculo de profundidade, calibração da câmera, e correção de distorção da lente para cada imagem.

4.3.4 Conexões elétricas

Cada dispositivo motor, servo motor ou motor de passo, determina conexões entre portas analógicas e digitais e o dispositivo. No caso dos motores de passo, foi necessária uma placa controladora de motor de passo.

Figura 14 - Conexões elétricas principais

4.3.5 Conexão elétrica do servo motor

O servo motor utiliza a porta analógica A0 e a porta digital PIN9 da placa microcontroladora principal. A tensão regulada por um potenciômetro determina a voltagem de entrada na porta A0.

Figura 15 - Conexões do servo motor

4.3.5.1 Conexões elétricas da placa controladora do motor de passo

O motor de passo é conectado à placa controladora de motor de passo, através de dois pares de contatos, cada par corresponde a cada bobina do motor de passo.

A direção e o passo do motor de passo do trilho vertical são controlados através dos pinos correspondentes DIR (direção) e STEP (passo), conectadas à placa controladora principal nos pinos digitais PIN2 e PIN3 respectivamente. O pino GND (terra) da placa controladora do motor de passo é conectado ao pino GND (terra) da placa controladora principal.

De forma análoga, a direção e passo do motor de passo do trilho horizontal são controlados através dos pinos DIR e STEP conectados aos pinos digitais PIN5 e PIN6 respectivamente.

A Figura 17 mostra a placa microcontrolada e suas portas ou pinos digitais, presentes na borda superior. Nesta figura é possível localizar a posição dos pinos 2 (PIN2), 3 (PIN3), 5 (PIN5) e 6 (PIN6) e o diagrama das conexões destes pinos com as placas controladoras de motor de passo.

Motor de passo	Vertical	Horizontal
DIR (direção)	PIN2	PIN5
STEP (passo)	PIN3	PIN6

Tabela 2 - Endereços dos pinos das placas controladoras de motor de passo

Figura 16 - Placa controladora de motor de passo

As placas controladoras de motor de passo são alimentadas com 12 volts de corrente contínua, fornecida por uma fonte de alimentação independente.

Figura 17 - Conexões DIR e STEP aos pinos digitais da placa microcontrolada principal

4.4 Funcionamento do dispositivo experimental

Inicialmente, deve-se definir o ângulo inicial e ângulo final de varredura do feixe de laser, através da manipulação do potenciômetro. A varredura é feita a cada parada da cabeça de leitura. O laser atinge o objeto a ser lido e reflete um ponto vermelho, no caso, luminoso. Nesta parada da cabeça de leitura, uma fotografia da imagem do objeto a ser lido com o ponto do laser é tirada, processada, e o ponto do laser é

identificado na imagem. Através da triangulação, calcula-se a profundidade, utilizada na plotagem tridimensional da superfície do objeto a ser lido.

A cabeça de leitura move-se na vertical, a um número de paradas e passo previamente definido no software aplicativo. Após completar o número de paradas, a cabeça de leitura retorna para a posição original, e o conjunto do trilho vertical, onde está a cabeça de leitura, é então movido na horizontal. Novamente o movimento vertical é efetuado, e o processo se repete até completar o número de paradas horizontal definidos previamente no software aplicativo.

Ao completar o processo de varredura do objeto, através dos movimentos do feixe de laser a cada parada, e movimentos ao longo do plano ortogonal a base do objeto, a matriz dos pontos tridimensionais adquiridos é tratada.

São eliminados os pontos que o laser não atinge o objeto, os pontos que o reflexo do laser não foi localizado por falta de intensidade.

Finalmente, a superfície e os pontos são plotados.

Figura 18 - Diagrama do funcionamento do leitor tridimensional a laser

4.5 Software do dispositivo experimental

O software do dispositivo experimental é composto pelo software embarcado na placa microcontrolada principal, escrito em linguagem C++, e o software aplicativo escrito em Matlab®. A comunicação entre ambos ocorre através da porta serial COM3.

Tanto o software aplicativo como o software embarcado leem e escrevem caracteres na porta serial. A porta serial possui um buffer interno, e toda vez que caracteres são lidos pelo software, os mesmos são também removidos do buffer.

O software aplicativo controla todo o processo, e através do envio de caracteres de comando pela porta serial, o software embarcado lê o caractere e executa a sub-rotina associada (ou “loop”).

O software aplicativo também disponibiliza interface com o usuário.

4.5.1 Software embarcado

O programa fonte em C++, embarcado na placa microcontrolada principal, é estruturado em componentes a citar: definição de variáveis (ou inicialização), definição da configuração, loop principal e definição de funções. A Figura 19 ilustra os principais componentes do software embarcado.

Figura 19 - Componentes do software embarcado

No loop principal, conforme o comando desejado (acionamento do motor de passo ou do servo motor), o caractere correspondente ao comando é enviado pelo software aplicativo para a porta serial, e é lido pelo software embarcado, e a sub-rotina correspondente é executada. Esta estrutura de programação é bastante flexível, pois permite ao programador adicionar ao loop principal novas sub-rotinas

caso deseje implementar no dispositivo experimental motores adicionais ou até transdutores. Basta que para isso, o programa aplicativo envie ao software embarcado os caracteres correspondentes aos comandos que se deseje adicionar.

Figura 20 - Sub-rotinas do loop principal do software embarcado

Figura 21 - Funções do software embarcado

A seguir, será abordado o código-fonte de cada bloco do software embarcado.

4.5.1.1 Definição de variáveis

As variáveis DIR_PIN e STEP_PIN são utilizadas para controle de direção e passo dos motores de passo, respectivamente. O número associado a cada variável indica o pino digital utilizado na placa microcontrolada principal.

Motor de passo horizontal	Motor de passo vertical
DIR_PINH 5	DIR_PINV 2
STEP_PINH 6	STEP_PINV 3

Tabela 3 - Definição das variáveis de controle dos motores de passo

```
#include <Servo.h>
#define DIR_PINV 2
#define STEP_PINV 3
#define DIR_PINH 5
#define STEP_PINH 6
```

Figura 22 - Código fonte: definição de variáveis do software embarcado (parte 1)

O servo motor é controlado pelas funções do objeto 'myservo', da classe 'Servo'. A variável 'potpin' identifica o pino analógico utilizado pelo potenciômetro, e a variável 'val' atribui valor ao pino analógico identificado. A variável 'angulo' é utilizada para o posicionamento do servo motor. A variável 'servomode' identifica o a sub-rotina a ser executada no loop principal.

```
Servo myservo; // cria objeto chamado servo, para controlar o
servomotor
int potpin = 0; // pino analogico usado para conectar o potenciometro
int val; // variável para ler o valor do pino analogico
int angulo;
unsigned char servomode;
```

Figura 23 - Código fonte: definição de variáveis do software embarcado (parte 2)

4.5.1.2 Definição de configuração

O código da configuração inicializa a porta serial a uma velocidade de transmissão de dados definida (9600 bps), identifica o pino digital de saída para o servo motor (pino 9), e atribui os valores das variáveis da direção e passo (DIR_PIN e STEP_PIN) como valores de saída para as placas controladoras de motor de passo.

```
void setup()
{
  myservo.attach(9); // associa o pino 9 ao objeto 'myservo'
  Serial.begin(9600); // opens serial port, sets data rate to 9600 bps
  servomode=190;
  pinMode(DIR_PINV, OUTPUT);
  pinMode(STEP_PINV, OUTPUT);
  pinMode(DIR_PINH, OUTPUT);
  pinMode(STEP_PINH, OUTPUT);
}
```

Figura 24 - Código fonte: configuração do software embarcado

4.5.1.3 Rotina (ou 'loop') principal

O processo é gerenciado pelo programa aplicativo principal, que controla qual variável deverá ser enviada para a porta serial. Conforme o valor atribuído à variável 'servomode', a sub-rotina correspondente é executada.

Figura 25 - Sub-rotinas do software embarcado no contexto do processo gerenciado pelo software aplicativo principal

Variável 'servomode'	Funcionalidade da sub-rotina
190	Posiciona o servo motor conforme valor ajustado pelo potenciômetro
191	Posiciona o servo motor conforme valor enviado pelo software aplicativo
192	Executa o movimento vertical do trilho
193	Executa o movimento horizontal do trilho
194	Retorna para posição vertical original
195	Retorna para posição horizontal original

Tabela 4 - Funcionalidades das sub-rotinas do software embarcado

Se o valor atribuído à variável 'servomode' for igual a '190', o pino analógico definido pela variável 'potpin' é lido. Conforme a posição ajustada pelo potenciômetro, a variável 'val' recebe o valor entre 0 (zero) e 1024 (mil e vinte e quatro). A função 'map' faz a correspondência deste valor para a escala de ângulos medidos em graus, ou seja, entre 0 (zero) e 179 (cento e setenta e nove) graus, e atualiza o valor da variável 'val' para medida em graus. A função 'write' do objeto 'myservo' posiciona o servo motor na posição em graus determinada pela variável 'val'. Foi inserida uma pausa de 40 (quarenta) milissegundos para permitir que o servo motor execute o movimento de posicionamento até a posição desejada, considerando a inércia do movimento de rotação. Esta posição é disponibilizada na porta serial para ser lida pelo software aplicativo do sistema de controle principal.

Esta sub-rotina é necessária para se definir o ângulo inicial e o ângulo final de varredura do feixe de laser, executada pelo movimento do servo motor. Portanto, esta sub-rotina será acessada duas vezes pelo software aplicativo, a primeira vez para definir o ângulo inicial e a segunda vez para definir o ângulo final de varredura.

```

void loop()
{
  while (servomode==190) // corresponde ao modo potenciometro
  {
    val = analogRead(potpin); // le o valor do potenciometro (valor entre 0 e 1023)
    val = map(val, 0, 1023, 0, 179); // converte escala (0-1023) para ângulo (0-179)
    myservo.write(val); // coloca o servo na posicao entre 0 e 179
    delay(40); // aguarda o servo se posicionar
    // escreve angulo:
    int sensorReading = analogRead(potpin);
    int angulo = map(sensorReading ,0, 1023, 0, 179);
    if (Serial.available() > 0)
    {
      servomode=Serial.read();
      Serial.println(angulo);
    }
  }
}

```

Figura 26 - Código fonte: sub-rotina de posicionamento do servo motor conforme ajuste do potenciômetro

Se o valor atribuído à variável 'servomode' for igual a '191', a porta serial é lida, e é atribuído à variável 'angulo', o valor do ângulo enviado pelo software aplicativo. O servo motor é posicionado neste ângulo. Foi inserida uma pausa de 40 (quarenta) milissegundos para permitir que o servo motor execute o movimento de posicionamento até a posição desejada.

```

while (servomode==191)
{
if (Serial.available() > 0){
    angulo=Serial.read();
    myservo.write(angulo);
    delay(40);
    if (angulo==192) {servomode=192;}
}
}

```

Figura 27 - Código fonte: sub-rotina de posicionamento do servo motor conforme valor do ângulo enviado pelo software aplicativo

Se o valor atribuído à variável 'servomode' for igual a '192', a função 'rotateDegv' é executada: o motor de passo vertical gira um número específico de graus (negativo para movimento reverso), a uma velocidade determinada, respectivamente, os argumentos de entrada da função 'rotateDegv'. Este motor de passo aciona o trilho vertical, e o cabeçote de leitura é movimentado na direção vertical.

```

while (servomode==192)
{
    //rotate
    rotateDegv(85.56, .1);
    delay(500);
    while (Serial.available() == 0)
    {}
    servomode=Serial.read(); //segunda leitura
    do angulo e limpa buffer de entrada
}

```

Figura 28 - Código fonte: sub-rotina de movimento vertical da cabeça de leitura

Em seguida, o buffer é lido e o valor lido é atribuído à variável 'servomode', valor este enviado pelo software aplicativo.

Se o valor atribuído à variável 'servomode' for igual a '193', a função 'rotateDegh' é executada: o motor de passo horizontal gira um número específico de graus (negativo para movimento reverso), a uma velocidade determinada, respectivamente, os argumentos de entrada da função 'rotateDegh'. Este motor de passo aciona a correia do trilho horizontal, e o conjunto 'trilho vertical-cabeça de leitura' é movimentado na direção horizontal.

```
while (servomode==193)
{
  //rotate
  rotateDegh(85.56, .1);
  delay(500);
  while (Serial.available() == 0)
  {}
  servomode=Serial.read(); //segunda leitura
do angulo e limpa buffer de entrada
}
```

Figura 29 - Código fonte: sub-rotina de movimento horizontal do conjunto trilho vertical onde está a cabeça de leitura

Em seguida, o buffer é lido e o valor lido é atribuído à variável 'servomode', valor este enviado pelo software aplicativo. Se o valor atribuído à variável 'servomode' for igual a '194', a função 'rotateDegv' é executada. Os argumentos enviados para esta função determinam o retorno da cabeça de leitura à posição original. Como mostra o código do software na Figura 30, o motor de passo vertical irá girar no sentido reverso, o número específico de graus, mas multiplicado pelo número de paradas, determinado no loop do software aplicativo principal.

```

while (servomode==194)
{
    //rotate
    rotateDegv(-256.68, .1);
    delay(500);
    while (Serial.available() == 0)
    {}
    servomode=Serial.read(); //segunda leitura
    do angulo e limpa buffer de entrada
}

```

Figura 30 - Código fonte: sub-rotina de retorno vertical da cabeça de leitura à posição original

Em seguida, o buffer é lido e o valor lido é atribuído à variável 'servomode', valor este enviado pelo software aplicativo. Se o valor atribuído à variável 'servomode' for igual a '195', a função 'rotateDegh' é executada. Os argumentos enviados para esta função determinam o retorno do conjunto trilho vertical e cabeça de leitura à posição original. Como mostra o código do software na Figura 31, o motor de passo horizontal irá girar no sentido reverso, o número específico de graus, mas multiplicado pelo número de paradas determinado no loop do software aplicativo principal.

Em seguida, o buffer é lido e o valor lido é atribuído à variável 'servomode', valor este enviado pelo software aplicativo.


```

while (servomode==195)
{
  //rotate
  rotateDegh(-256.68, .1);
  delay(500);
  while (Serial.available() == 0)
  {}
  servomode=Serial.read(); //segunda leitura
do angulo e limpa buffer de entrada
}
}

```

Figura 31 - Código fonte: sub-rotina de retorno horizontal do conjunto 'trilho vertical - cabeça de leitura'

4.5.1.4 Definição de funções

Há duas funções escritas no software embarcado, a função rotateDegv, quando acessada, executa o movimento do motor de passo vertical, e a função rotateDegh, executa o movimento do motor de passo horizontal.

Há dois argumentos de entrada para cada função, o primeiro argumento determina o número de graus que o motor de passo girará, e se este valor for negativo, o motor de passo girará no sentido inverso. O segundo argumento determina a velocidade angular, devendo ser um número entre 0.01 e 1, proporcional a velocidade e inversamente proporcional ao torque.

Argumento inicial	Motor de passo Vertical	Motor de passo Horizontal
Número de graus de rotação	Degv	Degh
Velocidade de rotação	Speedv	Speedh

Tabela 5 - Argumentos de entrada das funções

O significado de 'HIGH' ou 'LOW', em referência a um pino, depende da forma como o pino é configurado: pino de entrada ou saída.

Conforme o código fonte da configuração de pinos na Figura 24, tanto os pinos DIR_PINV quanto o STEP_PINV estão configurados como pinos de saída, através da função pinMode().

A Figura 22 indica no seu código fonte que o pino DIR_PINV corresponde ao pino 2 e o pino STEP_PINV corresponde ao pino 3, da placa microcontrolada principal.

Quando o pino é configurado como pino de saída, e definido em 'HIGH' pela variável 'dir', o pino DIR_PINV apresentará 5 volts de tensão. Neste caso, este pino pode fornecer corrente. A função 'digitalWrite' atribui portanto 5 volts de tensão ao pino 'DIR_PINV'.

A variável interna 'stepsv' calcula o número de passos que o motor de passo deve girar, a partir do valor em graus do argumento de entrada 'degv', da função 'rotateDegv'. A variável interna 'usDelay' controla a velocidade da rotação do motor de passo a partir do argumento de entrada 'speedv' da função 'rotateDegv'. A velocidade de rotação é controlada pela inserção de um atraso entre cada progressão de passo do motor de passo, e a variável 'speedv' indica o tempo em segundos deste atraso.

Dentro do loop que incrementa o contador 'iv' de 0 (zero) até o número de passos 'stepsv', cada vez que a função 'digitalWrite' coloca o pino 'STEP_PINV' no estado 'HIGH', o pino apresentará tensão de 5 volts necessária para o motor de passo girar uma unidade de passo. Quando este mesmo pino passa para o estado 'LOW', o motor de passo girará um passo na direção determinada pelo pino 'DIR_PINV'. O atraso em segundos entre cada movimentação (ou passo) do motor de passo é desempenhado pela função 'delayMicroseconds'.

```
void rotateDegv(float degv, float speedv)
{
    // define a direcao
    int dir = (degv > 0)? HIGH:LOW;
    digitalWrite(DIR_PINV,dir);
    int stepsv = abs(degv)*(1/0.225);
    float usDelay = (1/speedv) * 70;

    //executa o movimento
    //clock = manda subir e descer a onda quadrada (quando step vai de high para low, o
    motor de passo gira na direcao do dir_pin

    for(int iv=0; iv < stepsv; iv++)
    {
        digitalWrite(STEP_PINV, HIGH);
        delayMicroseconds(usDelay);
        digitalWrite(STEP_PINV, LOW);
        delayMicroseconds(usDelay);
    }
}
```

Figura 32 - Código fonte: função de rotação do motor de passo vertical

A função 'rotateDegh' controla a rotação do motor de passo horizontal de forma análoga. A Figura 22 indica no seu código fonte que o pino DIR_PINH corresponde ao pino 5 e o pino STEP_PINH corresponde ao pino 6, da placa microcontrolada principal.

Quando o pino é configurado como pino de saída, e definido em 'HIGH' pela variável 'dir', o pino DIR_PINH apresentará 5 volts de tensão. Neste caso, este pino pode fornecer corrente. A função 'digitalWrite' atribui portanto 5 volts de tensão ao pino 'DIR_PINH'.

A variável interna 'stepsh' calcula o número de passos que o motor de passo deve girar, a partir do valor em graus do argumento de entrada 'degh', da função 'rotateDegh'. A variável interna 'usDelay' controla a velocidade da rotação do motor de passo a partir do argumento de entrada 'speedh' da função 'rotateDegh'. A velocidade de rotação é controlada pela inserção de um atraso entre cada progressão de passo do motor de passo, e a variável 'speedh' indica o tempo em segundos deste atraso.

Dentro do loop que incrementa o contador 'ih' de 0 (zero) até o número de passos 'stepsh', cada vez que a função 'digitalWrite' coloca o pino 'STEP_PINH' no estado 'HIGH', o pino apresentará tensão de 5 volts necessária para o motor de passo girar uma unidade de passo. Quando este mesmo pino passa para o estado 'LOW', o motor de passo girará um passo na direção determinada pelo pino 'DIR_PINH'. O atraso em segundos entre cada movimentação (ou passo) do motor de passo também é desempenhado pela função 'delayMicroseconds'.

```

void rotateDegh(float deg, float speed)
{
    //rotaciona um numero especifico de graus (negativo para movimento reverso)
    //velocidade qualquer numero entre .01 -> 1 sendo 1 mais rápido e quanto menor, maior torque
    // define a direcao

    int dir = (deg > 0)? HIGH:LOW;
    digitalWrite(DIR_PINH,dir);
    int stepsh = abs(deg)*(1/0.225);
    float usDelay = (1/speed) * 70;

    //executa o movimento
    //clock = manda subir e descer a onda quadrada (quando step vai de high para low, o motor de passo gira na direcao do dir_pin

    for(int ih=0; ih < stepsh; ih++)
    {
        digitalWrite(STEP_PINH, HIGH);
        delayMicroseconds(usDelay);
        digitalWrite(STEP_PINH, LOW);
        delayMicroseconds(usDelay);
    }
}

```

Figura 33 - Código fonte: função de rotação do motor de passo horizontal

4.5.2 Software aplicativo em Matlab®

O software aplicativo controla todo o processo. É composto por dois programas principais, a citar:

- arduinoservo.m
- prova.m

O programa 'arduinoservo.m' desempenha as seguintes funções principais:

- interface com o usuário;

- comunicação com a porta serial, e portanto, com a placa microcontrolada principal;
- determinação do ângulo inicial e final do feixe de laser a cada parada da cabeça de leitura, e definição do passo em graus desejado ao longo do arco de varredura do feixe de laser;
- controle do número de movimentos verticais e horizontais da cabeça de leitura;
- aquisição da imagem do objeto atingido pelo feixe de laser;
- tratamento da imagem do objeto adquirida;
- tratamento dos pontos tridimensionais adquiridos;
- plotagem da superfície tridimensional obtida.

O programa 'arduinoteste.m' acessa o programa 'prova.m' , que trata a imagem adquirida pela câmera.

O programa 'prova.m' desempenha as seguintes funções principais:

- correção da imagem adquirida segundo os parâmetros de distorção da lente determinados pelo processo de calibração da câmera;
- decomposição dos canais RGB da matriz da imagem adquirida em 3 matrizes, cada qual correspondente ao canal das cores fundamentais vermelho (R), verde (G) e azul (Z);
- aplicação de um filtro em cada matriz de cor fundamental pelo valor médio de cada pixel com base nos valores dos pixels da vizinhança imediata (GONZALEZ, 1992);

- recomposição da matriz da imagem a partir de cada matriz de cor fundamental filtrada;
- identificação da localização do ponto do laser na matriz da imagem filtrada;
- plotagem do ponto do laser localizado sobre a imagem adquirida;
- cálculo do ângulo entre o ponto do laser identificado na imagem e o centro focal da câmera;
- cálculo, por triangulação, da distância do ponto do laser refletido pelo objeto, em relação a reta formada pelo centro focal da câmera e o ponto de saída do feixe do laser;
- armazenamento das coordenadas tridimensionais do pontos adquirido.

4.5.2.1 Inicialização

O programa aplicativo principal 'arduinoservo.m' é executado, a partir da versão do software aplicativo Matlab® R2011A (MATHWORKS, 2011).

A inicialização contempla a criação de dois objetos: o primeiro objeto identifica a entrada de vídeo que será utilizada pelo programa, e atribui este objeto à variável 'video'. O segundo objeto identifica a porta serial e seus parâmetros de transmissão e atribui este objeto à variável 's'

A porta serial é então aberta e se estabelece comunicação serial entre o computador e o dispositivo de leitura tridimensional a laser.

```

%inicializacao

video = videoinput('winvideo',
2,'YUY2_640x480');
set(video,'TimerPeriod',
0.5,'ReturnedColorSpace','rgb');
triggerconfig(video,'manual');

contaponto=0;
myBeta = 0.0;
myDis = 0.0;
myDeltaX = 0.0;

s= serial('COM3', 'BaudRate', 9600, 'Parity',
'none', 'DataBits', 8);
cont=2
step=10
clc
fopen(s)

```

Figura 34 - Código fonte: inicialização do programa principal 'arduinoteste.m'

A variável 'step' quantifica em graus o passo do ângulo de varredura.

4.5.2.2 Leitura do ângulo inicial e final de varredura do laser

A determinação do ângulo inicial ou final de varredura é feita através do ajuste do potenciômetro. O programa principal envia para a porta serial o caractere '190', e o software embarcado executa a rotina que aciona o potenciômetro. A interface gráfica com o usuário demanda que o usuário responda se já ajustou o ângulo (inicial ou final). A resposta afirmativa permite que o programa leia o conteúdo da porta serial e atribua este conteúdo à variável numérica 'angulo' e 'posicaoservo'. Um loop de dois passos é executado e o ângulo inicial e final são atribuídos às variáveis "angulo inicial" e "angulo final", respectivamente.


```

while cont > 0

resposta = 1;
while resposta
resposta = input('ajustou angulo - entre com valor 0 como resposta');
end
fprintf(s, '%s', char(190)); % envia variavel 190 que roda loop do
potenciometro que move servo motor para Arduino
while serial.BytesAvailable == 0 % caractere 190 lido e buffer esvaziado
end
% conteudo da porta serial lido (angulo do laser)
angulo = fscanf(s)
angulo = 179 - str2num(angulo);

disp('angulo lido')
posicao_servo = angulo;

if cont == 2
angulo_inicial = angulo
disp('angulo inicial=');
disp(angulo);
disp('ajuste o angulo final');
else
angulo_final = angulo
disp('angulo final=')
disp(angulo);
end

cont = cont - 1
end
disp('calculando o range...')

range = abs(angulo_final - angulo_inicial)

```

Figura 35 - Código fonte: leitura do ângulo inicial e final pelo programa 'arduinoteste.m'

A faixa de varredura corresponde ao valor absoluto da diferença entre o ângulo final e o ângulo inicial, atribuída à variável 'range'.

4.5.2.3 Loop de varredura do laser

O loop de varredura é efetuado a partir do ângulo final e caso seja maior que o ângulo inicial, decrementado pelo passo de varredura representado pela variável 'step', do contrário, incrementado pelo passo de varredura. O loop é controlado pela variável 'range', que é decrementada a cada execução pelo passo.

A cada parada do feixe do laser, a variável 'posicaoservo' armazena a posição do ângulo do feixe de laser, e a rotina de obtenção e tratamento de foto é executada.

```
posicaoservo=angulofinal;
% envia variavel 191 para entrar no loop do Arduino que posiciona servo
motor
fprintf(s,'%s',char(191));

while (range>=0) % angulo final (=posicaoservo) como posicao inicial do
motor no loop de varredura
pause(0.1); %aguarda resposta do arduino que o motor esta na posicao
```

ROTINA DE OBTENÇÃO E TRATAMENTO DE IMAGEM

```
% caractere 191 foi lido (buffer esvaziado):
whiles.BytesAvailable==0
end

% envia variavelposicao servo, sempre entre 0 e 179 ,para o arduino
enviaservo=char(179-posicaoservo);
fprintf(s,'%s',enviaservo);

%% decrementa passo atualizando variavelposicao servo
ifanguloinicial>angulofinal
posicaoservo = posicaoservo+step
else
posicaoservo = posicaoservo-step
end
range=range-step
end
```

Figura 36 - Código fonte: loop de varredura do laser do programa 'arduinoteste.m'

4.5.2.4 Obtenção da imagem

Uma fotografia é tirada e é armazenada na matriz 'myFoto'. A matriz myFoto contém valores tipo uint8 (entre 0 e 255), e é convertida para matriz I com valores tipo 'double' (entre 0 e 1). A matriz I, tem dimensões H x W x B, onde:

- H corresponde à altura da imagem em pixels;
- W corresponde à largura da imagem em pixels;
- B relaciona os índices 1, 2 ou 3, com a componente de cor fundamental vermelha (R), verde (G) ou azul (B), respectivamente.

Na matriz 'I', cada componente de cor possui um valor entre 0 e 255. A matriz I é tridimensional, a primeira posição e a segunda posição do elemento correspondem à distância vertical e distância horizontal, em pixels, do canto superior esquerdo da imagem, respectivamente, e a terceira posição corresponde ao índice da cor fundamental (1, 2 ou 3). O conteúdo da posição tridimensional corresponde à cor do pixel na escala de 0 a 255.

Se os elementos da matriz $I(h, w, 1)$, $I(h,w,2)$ e $I(h,w,3)$ forem todos iguais a 0, o pixel na posição (h,w) é apresentado na cor preta. Se todos forem iguais a 255, o pixel é apresentado na cor branca.

Por exemplo, para se determinar a cor do pixel da imagem na posição (18,10), procura-se o valor armazenado em $(18,10,1)$, $(18,10,2)$ e $(18,10,3)$, respectivamente. Por exemplo, a cor (51, 64, 22) é representada pelas suas respectivas quantidades de vermelho, verde e azul, numa escala de 0 a 255. Neste exemplo:

- $I(18,10,1) = 51$
- $I(18,10,2) = 64$
- $I(18,10,3) = 22$

```
disp('tira foto e roda tratamento foto')
start(video);
preview(video);
myFoto = getsnapshot(video);
stop(video);
I=double(myFoto);
% trata a foto e calcula a profundidade
clc;
prova1909()
```

Figura 37 - Código fonte do programa 'arduinoteste.m': obtenção da imagem do objeto alvo

A matriz I é em seguida tratada pelo programa 'prova1909.m'.

4.5.2.5 Tratamento da imagem

O programa 'prova1909.m ' desempenha o tratamento da imagem. O processo de tratamento de imagem exige como parâmetro de entrada a quantidade de vermelho, verde e azul do ponto do laser.

Cada ponto de laser refletido pela superfície do objeto contém na imagem uma quantidade de vermelho verde e azul, que são as cores fundamentais conhecidas pela sigla 'RGB', onde R corresponde ao vermelho, G ao verde e B ao azul. Conforme a rugosidade da superfície do objeto, opacidade, iluminação local do ambiente, quantidade de carga nas baterias da caneta laser, estas quantidades de RGB podem variar. Foram feitas medições de quantidade de vermelho, verde e azul da imagem da mesma fotografia, alterando estes parâmetros qualitativos. A Figura 38 mostra as quantidades de RGB provadas combinando alteração nos parâmetros de quantidade de carga nas baterias da caneta laser e opacidade da superfície do objeto.

O processo de tratamento de imagem exige como parâmetro de entrada a quantidade de vermelho, verde e azul do ponto do laser refletido pela superfície do objeto em estudo, Atribui-se estas quantidades de vermelho, verde e azul, no MATLAB, às variáveis myR, myG e myB.

Figura 38 - Efeito das características superficiais do objeto na reflexão do laser

```
%% Definicao das variaveis

myR = 255/255;
myG = 1/255;
myB = 151/255;

% converte o angulo do laser para radianos
myLaserAng = (pi/180)*double(posicaooservo);

% define a distancia fixa entre o laser e a webcam
myLaseCamDist = 80; % milimetros

%checa se foi feita a calibracao e logo existe a matriz kk
if ~exist('fc')|~exist('cc')|~exist('kc')|~exist('alpha_c')
    load('Calib_Results.mat')
end

mod_undistort_image_color()
```

Figura 39 - Código fonte do programa 'prova0909.m': parâmetros do ponto do laser e correção da imagem

A correção da imagem adquirida, segundo os parâmetros de distorção da lente adquiridos pelo processo de calibração da câmera, é efetuada pelo programa 'mod_undistort_image_color.m', e a matriz de saída 'I2' é obtida.

Em seguida, é efetuada a decomposição dos canais RGB da matriz da imagem adquirida, em 3 matrizes, cada qual correspondente ao canal das cores fundamentais em vermelho (R), verde (G) e azul (Z). As quantidades de cada cor

fundamental vermelha (R), verde (G) e azul (A) são armazenadas nas variáveis `myRed`, `myGreen` e `myBlue`, e obtidas da matriz `I2`. A matriz `I2` é calculada a partir da matriz `I`, pelo programa de correção da imagem devido à distorção da lente `'mod_undistort_image_color.m'`.

Cada canal é submetido a um filtro, através da função `'medfilt2'`, que atribui a cada pixel de saída o valor médio da sua vizinhança imediata, no caso de dimensões 3 x 3 pixels, ou seja, ao redor do pixel correspondente da imagem de entrada. A função `'medfilt2'` também preenche as bordas da imagem com zeros.

```
%% Filtro Media

% Separacao dos canais
myRed = I2(:,:,1);
myGreen = I2(:,:,2);
myBlue = I2(:,:,3);

myRedFil = medfilt2(myRed,[3 3]);
myGreenFil = medfilt2(myGreen,[3 3]);
myBlueFil = medfilt2(myBlue,[3 3]);

% Unir a imagem de novo
I2Fil = cat(3,myRed,myGreen,myBlue);
```

Figura 40 - Código fonte do `'prova0909.m'`: separação dos canais e filtro da imagem

A recomposição dos canais tratados é atribuída à variável `'I2Fil'`.

4.5.2.6 Pesquisa do ponto de laser

Cada elemento da matriz `'I2Fil'` é dividido pelo escalar 255, de forma que as quantidades das cores fundamentais fiquem compreendidas entre 0 e 1, sendo o valor unitário correspondente a 255, obtendo a matriz `'rgb'`.

A separação de canais de cores fundamentais da imagem é feita novamente, gerando 3 matrizes `r`, `g`, e `b`.

- $r = \text{rgb}(:, :, 1);$
- $g = \text{rgb}(:, :, 2);$
- $b = \text{rgb}(:, :, 3);$

Para o caso do experimento, as variáveis myR , myG e myB correspondem aos seguintes valores, também na escala de 0 a 1:

- $myR = 255 / 255;$
- $myG = 1 / 255;$
- $myB = 151 / 255;$

Pode-se utilizar o método gatilho (PRATT, 1991). Através deste método, cria-se uma condição atribuída a cada pixel da imagem, de forma a buscar os pixels da imagem cujas quantidades de cores fundamentais estejam próximas das cores fundamentais do ponto de laser refletido.

$$Rc = \frac{r}{\sqrt{(myR - r)^2 + (myG - g)^2 + (myB - b)^2}} > Q$$

Nesta fórmula, a notação do ponto após a variável matricial, em Matlab®, determina que esta condição seja testada para cada elemento da matriz de cores fundamentais r , g e b .

Se esta condição for verdadeira, é atribuída ao elemento da matriz Rc o valor 1, caso contrário, o valor será igual a 0. A matriz Rc apresenta as mesmas dimensões da imagem, no caso, 480 x 640 pixels, e é uma matriz cujo conteúdo é lógico.

A condição testa a divisão da quantidade de vermelho pixel a pixel da foto (quantificado entre zero e 1) pela distância da quantidade de vermelho, verde e azul

do ponto de laser refletido (quantificado entre zero e 1) à quantidade de vermelho, verde e azul da foto tirada (quantificado entre zero e 1). Se esta distância for maior que Q , o elemento da matriz Rc recebe o valor de 1.

Podemos generalizar o raciocínio, conforme segue:

Seja k_r , k_g e k_b fatores entre 0 e 1, que multiplicam os elementos da matriz de cor fundamental r , g e b , respectivamente. Logo:

$$Rc_{(k_r, k_g, k_b)} = \frac{k_r * myR}{\sqrt{(myR - k_r * myR)^2 + (myG - k_g * myG)^2 + (myB - k_b * myB)^2}} > Q$$

O termo $\sqrt{(myR - k_r * myR)^2 + (myG - k_g * myG)^2 + (myB - k_b * myB)^2}$ representa a distância do ponto (myR, myG, myB) ao ponto $(k_r * myR, k_g * myG, k_b * myB)$ e Q representa o gatilho.

Para $MyR=1$, dado que o emissor de laser é da cor vermelha, temos:

$$Rc_{(k_r, k_g, k_b)} = \frac{k_r}{\sqrt{(1 - k_r)^2 + (myG - k_g * myG)^2 + (myB - k_b * myB)^2}} > Q$$

$$f(k_r, k_g, k_b, Q) = \frac{k_r}{\sqrt{(1 - k_r)^2 + (myG - k_g * myG)^2 + (myB - k_b * myB)^2}} - Q > 0$$

Para um dado ponto de laser (myR, myG, myB) , constantes da função $f(k_r, k_g, k_b, Q)$, busca-se encontrar os valores de Q para k_r , k_g e k_b variando entre 0 e 1, que torne a função $f(k_g, k_b)$ positiva.

No espaço tridimensional RGB, podemos visualizar o ponto do laser e o ponto da imagem:

Figura 41 - Distância do ponto da imagem ao ponto do laser em coordenadas (R,G,B)

O valor de $Q=8,5$ foi obtido experimentalmente. Logo, a matriz lógica Rc foi obtida pela expressão:

$$Rc = \frac{r.}{\sqrt{(myR - r.)^2 + (myG - g.)^2 + (myB - b.)^2}} > 8,5$$

A presença do valor 1 na posição (linha, coluna) da matriz lógica Rc de mesmas dimensões que a matriz da imagem, indica que o pixel do laser está localizado na posição (linha, coluna) em pixels da imagem.

Atribui-se à matriz [laserRow, laserCol] as posições dos pixels da imagem que satisfazem a condição que ponto de laser é identificado, através da função 'find(Rc)'.

```

%% Pesquisa do ponto do laser

rgb=double(I2Fil)/255;
r=rgb(:,:,1);
g=rgb(:,:,2);
b=rgb(:,:,3);

%Pontos com muito vermelho perto do vermelho do ponteiro
Rc=r./sqrt((myR-r).^2+(myG-g).^2+(myB-b).^2)>8.5;
[laserRow,laserCol]=find(Rc);
myPonto = [mean(laserRow),mean(laserCol)];

image(uint8(I2Fil));
colormap(map);
hold on;
%title('Imagem filtrada e ponto do laser localizado ');
plot(myPonto(1,2),myPonto(1,1),'b+', 'MarkerSize',10);

```

Figura 42 - Código fonte do 'prova0909.m': pesquisa e identificação do ponto do laser na imagem

Dado que o ponto do laser tem dimensões maiores que o pixel unitário, a variável 'myPonto' corresponde à média dos valores dos elementos ao longo das dimensões da matriz [laserRow,laserCol].

Em seguida, é inserido um marcador sobre o ponto do laser localizado na imagem, através da função 'plot(myPonto(1,2), myPonto(1,1))'.

4.5.2.7 Registro do ângulo γ

O centro da câmera é denominado de foco da lente. A posição deste foco em relação à imagem obtida pela câmera é fornecida pelo processo de calibração da câmera, que gera imagens bidimensionais em pixels, do espaço tridimensional. O processo de calibração é executado pelos programas da biblioteca 'Camera Calibration Toolbox for Matlab®' (BOUGET, 2012), disponibilizados pela empresa *Mathworks®* (2012), proprietária do software Matlab®.

A execução do processo de calibração que será descrito mais adiante fornece a matriz K, conforme figura Figura 56. Os valores da posição (1,1) e (2,2) da matriz K correspondem à coordenada (x,y) do foco da câmera em relação ao sistema de coordenadas da câmera.

Figura 43 - Calibração da câmera: matriz K

No programa aplicativo 'prova0909.m', a variável que representa a matriz K é chamada de KK. Conforme detalhado no código fonte da Figura 45, o valor da distância focal f_x e f_y da matriz K correspondem a $myFcx = KK(1,1)$ e $myFcy = KK(2,2)$, respectivamente. Estes valores são disponibilizados nas quantidades medidas em pixels, logo, na mesma escala que a imagem, também em pixels. A matriz K também fornece a posição do centro da imagem bidimensional em relação ao seu canto superior esquerdo (posição 0,0), conforme mostra a Figura 44.

Figura 44 - Sistema referencial da câmera: distância focal e centro da imagem

```
%% Calculo do ângulo

myFcx = KK(1,1);
myFcy = KK(2,2);
myXc = KK(1,3);
myYc = KK(2,3);
myLx = myPonto(1,2);
myLy = myPonto(1,1);

% alteracao devido a camera web ser fixada no dispositivo a 90 graus
% gamma = atan((myLx-myXc)/myFcx);

gamma = atan((myLy-myYc)/myFcy);
angXrad = pi/2 - gamma
```

Figura 45 - Código fonte do 'prova0909.m': cálculo da profundidade

A Figura 46 ilustra, no espaço tridimensional, as dimensões atribuídas às variáveis γ , $myLx$, $myXc$, e $myFcx$. Para efeito de cálculo do ângulo γ , só nos interessa o valor $myFcx$ da posição do foco. Logo:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{myLx - myXc}{myFcx}\right)$$

Ou, conforme o código fonte: $\gamma = \arctan((myLx - myXc)/myFcx)$;

Onde:

$myXc = KK(1,3);$

$myYc = KK(2,3);$

$myLx = myPonto(1,2);$

$myLy = myPonto(1,1);$

Figura 46 - Determinação do ângulo γ

4.5.2.8 Cálculo da profundidade

Conhecido o ângulo γ , obtém-se o ângulo β , necessário para a triangulação e consequente cálculo da profundidade.

Do triângulo formado pelo centro focal F, pelo centro da imagem, e pela projeção do ponto de laser na imagem, sobre a longitudinal que passa pelo centro da imagem, conforme Figura 47:

$$\gamma + \beta + 90^\circ = 180^\circ$$

Ou:

$$\beta = 90^\circ - \gamma$$

Figura 47 - Ângulo β

Por trigonometria, a profundidade é calculada por:

$$mydis = \frac{\tan(myLaserAng) * myLaseCamDist}{(1 + \frac{\tan(myLaserAng)}{\tan(angXrad)})}$$

Ou:

$$h = \frac{\tan \alpha * d}{(1 + \frac{\tan \alpha}{\tan \beta})} = \frac{\tan \beta * d}{(1 + \frac{\tan \beta}{\tan \alpha})}$$

Figura 48 - Determinação da profundidade h

4.5.2.9 Sistema referencial de coordenadas

A unidade do sistema referencial de coordenadas é milímetros. Cada passo do movimento vertical ou horizontal foi determinado em 10 mm, mas que pode ser definido no software embarcado da placa controladora. A Figura 49 mostra os movimentos da cabeça de leitura no sistema referencial de coordenadas. Os movimentos verticais seguem descendentes e após o número de paradas verticais definidas no software aplicativo, o conjunto trilho vertical-cabeça de leitura avança na direção horizontal, a cabeça de leitura retorna à posição vertical original, e novamente seguem descendentes, e assim por diante, até atingir o número de paradas horizontais também definidas no software aplicativo.

Figura 49 - Sistema referencial de coordenadas

Percebe-se pela Figura 49 a grande flexibilidade em aumentar a cobertura do espaço tridimensional do sistema de coordenadas, através do aumento de paradas verticais, horizontais, e passos do servo motor do laser. Quanto maior o número de pontos, melhor definição da superfície.

4.5.2.10 Otimização do dispositivo – abordagem qualitativa dos erros de medição

A otimização do dispositivo é destinada a minimização ou redução dos erros na medição. Estes erros possuem várias fontes, a citar:

- a. Mecânica do dispositivo: o trilho vertical possui uma ligeira folga que permite sua rotação em torno do seu eixo ortogonal, que passa pelo ponto de fixação no trilho horizontal. O conjunto do servo-motor e laser são encaixados na

cabeça de leitura, e podem eventualmente se mover no plano do encaixe. A lente da câmera pode deixar a desejar quanto a sua qualidade, em prol de redução de custo do dispositivo, por exemplo, apresentar distorções do formato idealmente concêntrico de cada corte seccional paralelo. Uma lente distorcida gera uma imagem distorcida e altera a posição do ponto tridimensional obtido. A distância do foco em relação à imagem gerada, disponibilizada pelo processo de calibração, e essencial para o cálculo de profundidade, pode ser acrescida de incerteza devido à distorção da lente;

- b. Identificação do ponto do laser (software aplicativo): a imagem do ponto do laser refletido apresenta o formato elíptico. No processo de identificação de imagem, o primeiro pixel identificado pode não ser o centro da elipse. Lasers de melhor qualidade minimizam esta fonte de incerteza;
- c. Resolução da imagem: a proporção entre as dimensões reais do objeto e a resolução em pixels da imagem obtida pela câmera, determinam a dimensão real de um pixel, dada uma distância entre o objeto e a câmera;
- d. Iluminação ambiente: influi diretamente no teste da condição de busca do ponto do laser na imagem. Nesta rotina do software aplicativo, o valor definido como 'gatilho' é determinado para as condições de iluminação ambientais no momento da calibração do dispositivo. A iluminação ambiente é intrusiva na formação da imagem, e pode alterar a informação da quantidade de cores fundamentais presentes em cada pixel da imagem obtida;
- e. Rugosidade e material do objeto: conforme o material do objeto, a quantidade de luz refletida pode variar, e alterar o teste da condição de busca.

Quanto mais pontos de laser forem detectados a cada imagem obtida, melhor será a resolução da superfície gerada. As fontes de incerteza pertinentes à resolução da imagem, iluminação do ambiente, rugosidade e material do objeto, podem diminuir a quantidade de sucessos, mas compensada pelo incremento de paradas verticais e horizontais, bem como o decremento do passo de varredura do feixe do laser.

No capítulo 5, uma abordagem quantitativa do erro será feita com base em resultado experimental.

4.6 Instalação inicial (“setup”)

A calibração da câmera é necessária para correção das distorções da lente e determinação da distância do centro focal da lente em relação à imagem bidimensional formada pela câmera, bem como para determinação do centro desta imagem, em relação ao sistema referencial da câmera.

4.6.1 Calibração da câmera

A lente da câmera possui um centro focal, por onde passam os raios de luz refletidos do espaço físico tridimensional. Os raios de luz passam pelo centro focal da lente da câmera e se projetam no plano da imagem bidimensional formada pela câmera.

Neste modelo, a imagem bidimensional formada pela câmera, cujas dimensões são em pixels, está a uma distância (f) do foco da lente, conhecida como distância focal.

Mas como estamos tratando de pixels, é necessário ter o modelo da câmera, e o modelo mais simples é o '*pinhole camera model*'.

Figura 50 - Modelo de tratamento de pixels da câmera “pinhole camera model”

Para conhecer a distância focal de uma câmera, e as coordenadas do centro da imagem bidimensional gerada, deve-se executar o procedimento de calibração da câmera. Assume-se a partir da calibração que todos os pontos desta imagem pertencem a reta que passa pelo centro focal e o ponto $p=(p_1, p_2, p_3)$ do espaço físico tridimensional visível pela câmera.

Figura 51 - Centro focal da câmera

O procedimento de calibração utiliza a biblioteca de programas e funções de calibração disponíveis para o Matlab® e conhecida como ‘Camera Calibration Toolbox for Matlab’. Neste procedimento, utilizam-se folhas de calibração padronizadas, quadriculadas em preto e branco e impressas com uma impressora laser. É necessários definir numa folha de calibração quadriculada, a largura de cada quadrado, e tratar as bordas da imagem, de forma que o algoritmo processe apenas os pontos escuros e claros da folha de calibração contidos em cada quadriculado, sem a contaminação da informação das bordas mal definidas.

Figura 52 - Padrão quadriculado da folha de calibração

As folhas de calibração são dispostas em várias posições e ângulos ao redor da câmera, enriquecendo o algoritmo de calibração com informações suficientes para determinação da distância do centro focal (F) ao centro do quadriculado da folha de calibração.

Figura 53 - Calibração da câmera com o uso de folhas quadriculadas

Através de uma interface gráfica ao usuário (GUI), acionada através da função `calib_gui`, as funções de tratamento das imagens utilizadas para calibração da câmera estão presentes, tais como extração das bordas das grades.

Figura 54 - Interface gráfica do software de calibração da câmera

A opção de menu “Extract grid corners” é a utilizada para remover as bordas indesejáveis no processo de tratamento das imagens de calibração. A título de ilustração, a Figura 55 mostra o processo de tratamento de bordas da imagem das folhas de calibração, e uma captura de tela da rotina em execução em MatLab® que efetua este tratamento destas bordas.

Conforme mostra o menu da Figura 54, há uma controle para remover a distorção presente na imagem, por conta da distorção da lente (“undistort image”).

A remoção do efeito de distorção é executada em cada arquivo da imagem obtida, pelo algoritmo presente no programa ‘mod_undistort_image_color.m’, da biblioteca ‘Camera Calibration Toolbox for Matlab’. Neste algoritmo, a lente ideal é modelada por secções circulares paralelas, e uma lente distorcida mostra a presença de elipses a cada corte seccional da lente.

Figura 56 - Algoritmo de correção da distorção da lente

Este algoritmo pode também ser explicado pelo seguinte exemplo:

Apresente uma esfera branca com listras pretas concêntricas ao eixo que passa pelo foco da lente da câmera e pelo centro da esfera. A foto de uma lente ideal esférica deveria representar uma série de círculos concêntricos. Se houver distorção na lente

da câmera, a foto exibirá combinações de elipsoides ao invés de círculos. Este algoritmo transforma matriz de pixels de elipsoides em uma matriz de pixels de círculos.

A execução do procedimento de calibração é necessária para o cálculo dos parâmetros intrínsecos da câmera, e os resultados são armazenados na matriz K (BOUGUET, 2013).

Figura 57 - Parâmetros intrínsecos da câmera

A matriz K fornece, portanto, a coordenada do centro da imagem (x-offset, y-offset) e a distância do centro focal da lente da câmera ao centro da imagem.

Uma vez conhecidos o centro focal e o centro da imagem gerada pela câmera, é possível determinar o ângulo formado entre qualquer ponto da imagem, o foco da câmera e o centro da imagem.

4.7 Metodologia de utilização do dispositivo experimental

Antes de colocar o leitor em operação, deve-se efetuar pelo menos uma vez a calibração da câmera. O processo de calibração da câmera determina a distância focal da câmera ao centro da imagem bidimensional que a câmera gera. O centro focal é definido pelo ponto da lente por onde passam todos os feixes de luz refletida do espaço tridimensional e registrados na imagem bidimensional. Após a calibração, pode-se utilizar o leitor tridimensional a laser.

Segue o procedimento de utilização do dispositivo experimental:

Setup

- 1- Conecte a placa microcontroladora via porta USB à porta serial COM3 disponibilizada pelo computador.
- 2- Conecte a câmera a uma porta USB disponível.
- 3- Conecte a fonte de alimentação 12 volts CC à tomada, que irá alimentar as placas controladoras dos motores de passo. Os motores de passo irão acionar as correias dos trilhos de movimento horizontal e vertical.
- 4- Inicia-se o software Matlab e roda-se o programa 'arduinoteste.m'.

Definição de ângulo inicial e final de varredura

- 5- Através do potenciômetro, posicione o feixe de luz laser no objeto no ângulo inicial, e tecle "0" informando ao software aplicativo que este será o ângulo inicial;

- 6- Posicione o feixe de luz no objeto de forma que este será o ângulo final, e tecele e tecele “0” informando ao software aplicativo que este será o ângulo final.

Figura 58 - Processo de inicialização do leitor tridimensional a laser

Aquisição de pontos

- 7- O servo motor irá movimentar o feixe de laser, e irá efetuar a varredura do ângulo inicial ao ângulo final, a um passo em ‘graus’ definido na rotina do software aplicativo.

A cada posição do feixe de laser:

- uma fotografia é tirada pela câmera, gerando um arquivo de imagem;
- Processa-se este arquivo de imagem para correção da distorção da lente da câmera, através do uso do operador matricial, já que o arquivo de imagem é uma matriz;
- Identifica-se a localização do ponto de laser luminoso na imagem capturada e assim, calcula-se a profundidade deste ponto.

- 8- Após a varredura do laser, a cabeça de leitura irá se mover na vertical, a um passo definido na rotina do software aplicativo, e retornar ao passo 7 deste procedimento.

- 9- Após completar o número de paradas na vertical, a cabeça de leitura retornará à posição vertical inicial, e o conjunto 'trilho vertical-cabeça de leitura' irá se mover na horizontal, a um passo definido na rotina do software aplicativo.
- 10- Após completar o número de paradas horizontais, o conjunto 'trilho vertical-cabeça de leitura' irá retornar para a posição horizontal inicial.
- 11- Plota-se o conjunto de pontos tridimensionais válidos, gerando assim a superfície do objeto exposta ao leitor tridimensional a laser.

Figura 59 - Processo de aquisição de pontos com leitor tridimensional a laser

5 Resultados experimentais

A condução dos experimentos, além da função de prova experimental do conceito de triangulação a laser, é base para aprimoramento do dispositivo de leitura. A obtenção de superfície depende da quantidade de pontos adquirida. Os parâmetros que determinam o número de pontos adquiridos são: o número de paradas horizontais e verticais, passo vertical, passo horizontal, ângulo inicial e final (faixa de varredura), e passo angular de varredura do laser.

Foram efetuados experimentos variando a faixa de varredura, o passo de varredura, e o número de paradas verticais e horizontais. Foram lidas duas superfícies planas e quinadas. Os parâmetros utilizados para cada experimento são indicados na tabela abaixo:

Superfície do objeto	Plana Inclínada		Quínada	
Faixa de varredura	51° a 90°	45° a 96°	64° a 79°	56° a 109°
Passo de varredura	5°	2°	1°	1°
Número de paradas verticais	3	3	3	5
Número de paradas horizontais	3	3	3	5
Total de pontos adquiridos	72	225	144	1350

Tabela 6 - Experimentos realizados com leitor tridimensional a laser

5.1 Experimento 1a: leitura de uma superfície plana inclinada em relação ao plano de leitura

- Ângulo inicial de varredura do laser = 51°
- Ângulo final de varredura do laser = 90°

- Passo angular de varredura do laser = 5°
- Paradas verticais = 3
- Paradas horizontais = 3
- O total de pontos coletados foi igual a 3 (vertical) x 3 (horizontal) x 8 (varredura) = 72 pontos
- Pontos coletados com sucesso = 64 pontos. A matriz representada pela variável 'tridim' irá ter as dimensões de 3 linhas (coordenadas tridimensionais) por 64 colunas, cada coluna corresponde a um ponto coletado com sucesso.

Figura 60 - Leitura de superfície de objeto plano inclinado

Ou seja, 89 % dos pontos lidos foram identificados com sucesso na imagem tridimensional.

A Figura 61 mostra a disposição dos pontos válidos no espaço tridimensional.

Identificou-se 8 pontos espúrios do total de 64 pontos coletados com sucesso.

Figura 61 - Disposição dos pontos válidos no espaço: leitura de superfície plana com baixa resolução de pontos

Percebe-se pela figura que embora a maioria dos pontos apresente pequena variação na profundidade, houve uma incerteza significativa na direção horizontal.

Isto pode ser explicado por:

- a) formato elíptico do reflexo do laser sobre a superfície do objeto.

Figura 62 - Identificação do ponto no reflexo do laser

A região vermelha corresponde a área identificável pelo processamento da imagem. O feixe de laser se movimenta paralelo ao plano horizontal da mesa, e forma uma elipse na superfície do objeto.

- b) O cálculo da coordenada horizontal do ponto é função da tangente do ângulo do laser (α). A incerteza no posicionamento do eixo do servo motor afeta o valor do ângulo do laser.

5.2 Experimento 1b: leitura de uma superfície plana inclinada em relação ao plano de leitura com redução do passo de varredura e aumento da faixa de varredura

- Ângulo inicial de varredura do laser = 45°
- Ângulo final de varredura do laser = 96°
- Passo angular de varredura do laser = 2°
- Paradas verticais = 3
- Paradas horizontais = 3

- O total de pontos coletados foi igual a 3 (vertical) x 3 (horizontal) x 25 (varredura) = 225 pontos
- Pontos coletados com sucesso = 170 pontos.

Ou seja, 76 % dos pontos lidos foram identificados com sucesso na imagem tridimensional.

A Figura 61 mostra a disposição dos pontos válidos no espaço tridimensional. Identificou-se ausência dos pontos espúrios do total de pontos coletados com sucesso.

Figura 63 - Disposição dos pontos válidos no espaço: leitura de superfície plana com elevada resolução de pontos

5.3 Experimento 2a: leitura de uma quina de caixa

- Ângulo inicial de varredura do laser = 64°
- Ângulo final de varredura do laser = 79°
- Passo angular de varredura do laser = 1°
- Paradas verticais = 3
- Paradas horizontais = 3
- O total de pontos coletados foi igual a 3 (vertical) x 3 (horizontal) x 16 (varredura) = 144 pontos
- Pontos coletados com sucesso = 136 pontos.

Ou seja, 94 % dos pontos lidos foram identificados com sucesso na imagem tridimensional.

Figura 64 - Leitura de quina de caixa

A Figura 61 mostra a disposição dos pontos válidos no espaço tridimensional. Identificou-se presença de pontos espúrios do total de pontos coletados com sucesso.

Figura 65 - Disposição dos pontos válidos no espaço: leitura de uma quina de caixa com baixa resolução de pontos

5.4 Experimento 2b: leitura de uma quina de caixa com incremento do número de paradas verticais e horizontais, e aumento da faixa de varredura do laser

- Ângulo inicial de varredura do laser = 56°
- Ângulo final de varredura do laser = 109°
- Passo angular de varredura do laser = 1°
- Paradas verticais = 5

- Paradas horizontais = 5
- O total de pontos coletados foi igual a 5 (vertical) x 5 (horizontal) x 54 (varredura) = 1350 pontos
- Pontos coletados com sucesso = 306 pontos.

Ou seja, 23 % dos pontos lidos foram identificados com sucesso na imagem tridimensional.

Conforme ilustrado na Figura 66, as 5 paradas verticais são identificadas pela concentração de pontos plotados. Observa-se que na posição vertical 40 mm e 50mm, apenas um lado da quina se torna visível à câmera, razão pela qual apenas pontos de um dos lados da caixa foram adquiridos. A quantidade reduzida de pontos lidos com sucesso deve-se à limitação do raio de visão da câmera web, para um maior número de paradas horizontais.

Dado o número suficiente de pontos coletados com sucesso, foi possível a visualização da quina.

Figura 66 - Disposição dos pontos válidos no espaço: leitura de uma quina de caixa com elevada resolução de pontos

Figura 67 - Vista superior da quina

5.5 Experimento 3: abordagem quantitativa dos erros de medição: leitura de lateral de caixa

A lateral de uma caixa foi lida, conhecida a largura, no caso, de 130 mm, medida com régua.

Figura 68 - Leitura de lateral de caixa

- Ângulo inicial de varredura do laser = 52°
- Ângulo final de varredura do laser = 142°
- Passo angular de varredura do laser = 1°
- Paradas verticais = 5
- Paradas horizontais = 5
- O total de pontos coletados foi igual a 5 (vertical) x 5 (horizontal) x 90 (varredura) = 2250 pontos
- Pontos coletados com sucesso = 326 pontos.

Ou seja, 14 % dos pontos lidos foram identificados com sucesso na imagem tridimensional. Muitos pontos refletidos foram eliminados, pois se situavam fora da superfície do objeto, dado que a varredura de 90 graus foi efetuada de grau em grau.

Figura 69 mostra a disposição dos pontos válidos no espaço tridimensional.

Figura 69 - Disposição dos pontos válidos no espaço: leitura de uma lateral de caixa

A largura da caixa é medida pelo intervalo entre o valor mínimo e máximo da coordenada horizontal, ou, -41 mm e 79 mm, respectivamente, obtidos da matriz de pontos 'tridim'.

Logo, a largura medida pelo dispositivo é igual a 120 mm. O erro de medição em relação ao medido pela régua (130 mm) é igual a:

$$erro = \frac{|120 - 130|}{130} = 7,7 \%$$

6 Aplicação prática do leitor tridimensional a laser em embarcações

A partir da prova experimental, podem-se vislumbrar aplicações do dispositivo em escala real, e projetar seus elementos básicos nesta escala. A aplicação do dispositivo para a obtenção da superfície do casco submerso pode ser exemplificada conforme segue.

Idealiza-se a fixação de uma barra horizontal ao longo do comprimento longitudinal da embarcação, sobre a borda livre.

Uma barra na direção transversal à embarcação é projetada para bombordo (ou boreste), a uma distância suficiente, e a partir da qual permitir que a barra vertical fixa a ela possa se mover longitudinalmente ao longo da embarcação, sobre a barra horizontal que desempenha a função de trilho.

Uma cabeça de leitura é acoplada para mover-se ao longo da barra vertical, capturando as imagens do casco atingidas por um feixe de laser.

Motores de corrente contínua acionam o conjunto barra transversal/barra vertical ao longo da barra horizontal, e da cabeça de leitura ao longo da barra vertical.

Pode-se utilizar vigas do tipo “BOSCH”, e grampos de fixação, para toda a montagem, e aproveitar o perfil do trilho para projetar a conexão rolante, tanto da conexão entre a barra transversal e a barra horizontal, como a conexão entre a cabeça de leitura e a barra vertical.

A Figura 70 mostra o esquema de montagem idealizado, das barras e do leitor.

Figura 70 - Esquema de montagem do scanner tridimensional a laser

Figura 71 - Barras "BOSCH" (DIRECT INDUSTRY, 2012)

O volume tridimensional das obras vivas capturado pelo leitor tridimensional a laser é utilizado para calcular:

- KB (posição transversal do centro de carena)
- ∇ (volume de deslocamento)
- I_t (momento de inércia do plano de linha d'água)
- $BM = \frac{I_t}{\nabla}$ (raio metacêntrico)

6.1 Construção da curva de estabilidade estática com dados instrumentados

É fundamental a validação das curvas hidrostáticas originais de projeto com a construção das mesmas a partir do volume submerso obtido com a instrumentação.

A prova de inclinação deve ser feita após esta validação, pois o cálculo da altura do centro de gravidade utiliza a leitura da posição do metacentro a partir das curvas hidrostáticas, para o dado calado. Se houver alterações no casco que provoquem alterações no volume submerso para dado calado, e que provoquem discrepância com o projeto original, as curvas hidrostáticas deverão ser geradas e feitas a medição in loco, e não ao projeto original.

A varredura tridimensional do casco deverá ser feita sempre antes da prova de inclinação, pois a obtenção do deslocamento da embarcação é necessária para o cálculo da altura metacêntrica.

6.2 Utilização de leitor tridimensional a laser em meio aquoso

O dispositivo deve ser construído em compartimento estanque, para sua utilização em meio aquoso. O feixe de laser deverá atravessar uma janela de vidro. Quando uma luz incide numa superfície de coeficiente de refração diferente (vidro), geralmente ocorre uma refração e uma reflexão na interface (HORIKAWA, 1999).

O percurso do laser se dará do ar para o vidro, e do vidro para o meio aquoso, e o fenômeno de refração deverá ser estudado, pois altera o percurso do feixe de laser, em conformidade com a lei de Snell. Parte da luz incidente (meio 1) sofre uma refração e se propaga no meio diferente (meio 2).

$$n_1 * \sin \theta_1 = n_2 * \sin \theta_2$$

Sendo

n_1 : coeficiente de refração do meio 1

n_2 : coeficiente de refração do meio 2

θ_1 : ângulo de incidência no meio 1

θ_2 : ângulo de refração no meio 2

Figura 72 – Lei de Snell

Outro aspecto a ser considerado é a influência da salinidade ou presença de poluentes (por exemplo: lodo) na água do rio. A ciência da espectroscopia de absorção refere-se a técnicas que medem a absorção de radiação como função de frequência ou comprimento de onda. Os elementos dissolvidos na água de rio turva podem absorver parte da faixa de frequência de luz do laser e prejudicar a medição.

A densidade da água deve ser uniforme no entorno do casco, de forma que o coeficiente de refração seja constante. Sugere-se que a medição seja feita afastada de fontes de calor, ou com os motores desligados.

A iluminação da superfície submersa é secundária. Deve-se garantir que a luz emitida do laser tenha potência suficiente para permitir o registro da fotografia do reflexo da luz laser na superfície.

7 Conclusão

Este trabalho descreve todo o processo da criação de dispositivo experimental para resolver o problema de como se obter uma superfície tridimensional a baixo custo e com componentes de alta disponibilidade. Pode-se utilizar este processo para a criação de outros dispositivos. A placa microcontroladora deste dispositivo pode ser conectada a outros sensores e atuadores, para outras finalidades. Por exemplo, acelerômetros podem registrar ao longo do tempo o ângulo de inclinação, e assim viabilizar a criação de um registro histórico da embarcação, em cada trajeto percorrido. Tubos de Pitot com medidores de pressão podem registrar a velocidade do escoamento, torquímetros podem ser instalados no eixo do motor e 'rate gyros' podem medir a rotação do eixo do hélice, para cálculo de coeficientes propulsivos.

O universo de aplicações de dispositivos experimentais para instrumentação de fenômenos hidrodinâmicos ou propulsivos para o setor naval é de grande valia, e a descrição e detalhamento do processo percorrido para criação de um dispositivo experimental aplicado a um problema real conclui este trabalho.

O resultado gerado pela utilização do dispositivo experimental de leitura de superfícies foi satisfatório. Conforme mostram os resultados experimentais do capítulo 5, a superfície gerada reflete o formato da superfície exposta do objeto em estudo, ao leitor tridimensional a laser. Este dispositivo foi construído a partir do conceito teórico da triangulação, e a utilização deste conceito foi comprovada experimentalmente. A concepção do dispositivo com a utilização de componentes construtivos e eletrônica associada com materiais de baixo custo indica que é possível a construção de um dispositivo real, em escala comercial, a um custo inferior aos leitores tridimensionais existentes no mercado.

A metodologia de concepção, construção e automação de dispositivo experimental, apresentados neste trabalho, pode servir como guia e inspiração para a comunidade científica, que vislumbre desenvolver novos dispositivos a partir de conceitos teóricos.

Este trabalho detalha o funcionamento das rotinas e códigos de programação de linguagem C embarcada na placa microcontrolada, e do software aplicativo Matlab®. Além disso, descreve a forma como é estabelecida a comunicação via porta USB entre o dispositivo e o computador. A construção de 'loops' individuais na programação embarcada na placa microcontrolada para cada sensor ou atuador existente no dispositivo, oferece flexibilidade para adicionar novos sensores e/ou atuadores (motores). No caso, não demanda modificações significativas na estrutura de programação do software embarcado.

Ainda que o controle das incertezas tenha sido feito apenas de forma qualitativa, o resultado obtido reflete a geometria da superfície adquirida.

A aplicação do dispositivo experimental para obtenção de superfícies de cascos submersos demanda adaptação do dispositivo para a escala destinada ao uso real. Os elementos básicos do dispositivo, tais como motores acionadores, mecânica da instrumentação, arranjo geral, eletrônica e programação de software podem ser aproveitados para a construção de um dispositivo real. No caso, fatores como opacidade do meio fluído, cálculo de incertezas, proteção hermética contra infiltração de água, entre outros, devem ser endereçados na construção do dispositivo real.

O trabalho sugere a concepção genérica de um dispositivo real para leitura de superfícies submersas sem demandar a necessidade de remover o casco para um

dique seco, o que torna o trabalho de verificação da estabilidade estática de embarcações in loco viável, do ponto de vista operacional e econômico. Portanto, este dispositivo experimental contribui de forma significativa para a resolução do problema de se obter a superfície submersa de embarcações a baixo custo, e que pode ser utilizado em larga escala pelos usuários, com a utilização de materiais e tecnologia disponíveis no mercado nacional.

A utilização de superfícies de objetos, obtidas pelo leitor, tem ampla aplicação na indústria naval, petrolífera, o que reforça a contribuição deste trabalho.

8 Proposta de trabalhos futuros

A partir da concepção, construção e utilização de dispositivo experimental destinado à obtenção de superfícies, pode-se vislumbrar o desenvolvimento de trabalhos futuros, focados no apoio à Marinha do Brasil necessário para a fiscalização de estabilidade estática de embarcações, e assim, contribuir de forma significativa na segurança e salvaguarda da vida de tripulantes e passageiros, conforme segue:

- Projeto e construção de dispositivo real para utilização em embarcações, contemplando mecânica da instrumentação, sensores e acionadores, e eletrônica associada;
- Adaptação do dispositivo para ser utilizado submerso em águas fluviais. Contempla o estudo da absorção de faixas de frequência de luz do laser absorvidas pela contaminação da água fluvial, testes com amostras de diferentes rios navegáveis, testes com cascos de diferentes rugosidades e estágio de formação de cracas, e iluminação ambiental.
- Otimização do dispositivo, contemplando utilização de câmera com maior capacidade de ampliação (zoom) e imagem gerada com maior resolução (em pixels), lente de melhor precisão geométrica e transparência, emissor de laser de maior precisão e potência, maior precisão do movimento mecânico do dispositivo real, e controle de iluminação ambiental do dispositivo em meio submerso;
- Análise e propagação de erros do dispositivo real, minimização dos erros, análise e redução dos dados;

- Calibração do dispositivo real com um barco modelo cujo plano de linhas é conhecido e validado, criação de procedimento de utilização do dispositivo real nas balizas do casco submerso;
- Desenvolvimento de procedimento de homologação do dispositivo real;
- Novo certificado de estabilidade estática de embarcação prevendo a utilização da obtenção da superfície da embarcação in loco, a periodicidade de vistoria in loco de estabilidade intacta de embarcações, e a periodicidade de calibração da instrumentação utilizada;
- Validação dos dados adquiridos com base de dados da Marinha, a partir da comparação do plano de linhas adquirido pela vistoria in loco com o registrado pelas autoridades marítimas;

Referências

- HORIKAWA, O. Introdução à Metrologia Ótica, Universidade de São Paulo, 1999.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS: publicações, normas e estatísticas sobre navegação fluvial. Disponível em:<<http://www.antaq.gov.br/Portal/default.asp>>. Acesso em 21 jan. 2013.
- ARDUINO: site de suporte de linguagem de programação da placa Arduino e diagramas de conexões com sensores e atuadores. Disponível em:<<http://arduino.cc/en/Reference/HomePage>>. Acesso em 21 jan. 2013
- BEER, S, Brain of the Firm; Allen Lane, The Penguin Press, London, Herder and Herder, USA, 1972.
- BOUGUET, J. Y., Camera Calibration Toolbox for Matlab®. Disponível em:<http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/>. Acesso em 21 jan. 2013.
- DIRECT INDUSTRY, Barras de montagem do tipo “Bosch”. Disponível em:<http://img.directindustry.es/images_di/photo-m2/perfiles-de-aluminio-43652.jpg>. Acesso em 21 jan. 2013.
- DIRETORIA DE PORTOS E COSTAS: Normas da Autoridade Marítima Normam 2, Capítulo 6, item 0636. Disponível em:<https://www.dpc.mar.mil.br/normam/tabela_normam.htm>. Acesso em 21 jan. 2013.
- GONZALEZ, R. C., WOODS, R. E., Digital Imaging Processing, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA, 1992.

- MATHWORKS®: site de suporte ao software aplicativo Matlab®. Disponível em:
<[http://www.mathworks.com/support/ml_search_results.html?q=product:"MATLAB"](http://www.mathworks.com/support/ml_search_results.html?q=product:)>. Acesso em 21 jan. 2013.
- PRATT, W.K., Digital Image Processing (second edition), John Wiley & Sons, New York, 1991.
- SPARK ELETRONICS®: site sobre sensores e atuadores. Disponível em:<<http://www.sparkfun.com/>>. Acesso em 21 jan. 2013.

APÊNDICE A: Altura metacêntrica

Considera-se uma embarcação com obras vivas simétricas em relação à linha de centro, como é o caso da grande maioria das embarcações fluviais, com ângulo de banda $\partial\phi$, e afastando o centro de carena B da linha de centro da embarcação. As linhas que definem a direção da força peso e da força de flutuação se separam a uma distância GZ , conhecida como braço de endireitamento. Conforme mostra a Figura 73 - **Metacentro transversal M** , a linha vertical que passa pela posição do centro de carena B_1 e intercepta a linha vertical que passa pelo centro de carena B na condição original encontram-se no ponto M , conhecido como metacentro transversal, quando o ângulo de banda $\partial\phi$ tende a zero.

Figura 73 - Metacentro transversal M

Para ângulos de banda pequenos, até 10° (dez graus), o ponto M fica praticamente estacionário. Nesta condição, conhecida a posição do centro de gravidade G e o metacentro M , o braço de endireitamento GZ pode ser aproximado por:

$$GZ = GM \times \sin \partial\phi$$

O valor de GM é conhecido como altura metacêntrica transversal. Quando o ponto M está acima do ponto G, o valor de GM é assumido como positivo, dado que o braço de endireitamento tende a restaurar a embarcação para a posição original (orientada para cima) e caso contrário, o valor de GM é negativo.

Figura 74 - Localização do metacentro transversal M

Quando a embarcação está inclinada a um ângulo de banda pequeno $\partial\theta$, a nova linha d'água irá interceptar a linha d'água na condição original no plano de linha de centro. Assume-se que os costados são próximos à linha d'água e que os volumes de cunha (v) formados entre as duas linhas d'água sejam iguais, cujos centros de gravidade são G_1 e G_2 conforme Figura 74.

Neste caso, o centro de carena B irá se mover na direção paralela à linha que conecta os pontos G_1 e G_2 e a distância BB_1 será, na nova condição de equilíbrio, igual a:

$$BB_1 = \frac{v \times G_1 G_2}{V}$$

A medida que o ângulo de banda tende a zero, a linha G_1G_2 e portanto BB_1 , se tornam perpendiculares à linha de centro da embarcação. Podemos afirmar que qualquer variação na superfície do costado se torna desprezível, e podemos afirmar que a distância BM ou raio metacêntrico, será igual a:

$$BM = \frac{BB_1}{\tan \partial \theta}$$

Seja y a variável correspondente a metade da boca da embarcação na seção transversal localizada a uma distância x da perpendicular de proa ou popa. A área da seção transversal da cunha será igual a área do triângulo, cuja base é igual a $y \times \tan \partial \theta$ e a altura igual a y . A distância entre os centroides das cunhas é igual a $2 \times \frac{2}{3} \times y$.

Considerando todo o comprimento L entre perpendiculares da embarcação para o dado calado, o valor do volume v da cunha multiplicado pela distância entre os centroides G_1G_2 , será igual a:

$$v \times G_1G_2 = \int_0^L \frac{1}{2} \times y \times \tan \partial \theta \times y \times 2 \times \frac{2}{3} \times y \, dx$$

Ou,

$$\frac{v \times G_1G_2}{\tan \partial \theta} = \frac{2}{3} \int_0^L y^3 \, dx$$

Sabe-se que o momento de inércia I_t de uma figura definida por uma curva e uma reta, sendo a reta definida como seu eixo, x no caso, é igual a:

$$\partial I_t = \partial x \partial y \times y^2$$

$$I'_t = \int_0^L \int_0^y y^2(x) dy dx$$

$$I'_t = \frac{1}{3} \int_0^L y^3 dx$$

Se considerarmos a linha de centro da embarcação como o eixo do momento de inércia I_t da superfície de linha d'água para dado calado:

$$I_t = 2 \times I'_t = 2 \times \frac{1}{3} \int_0^L y^3 dx$$

Logo,

$$\frac{v \times G_1 G_2}{\tan \partial \theta} = \frac{2}{3} \int_0^L y^3 dx = I_t = BM \times \nabla$$

Ou,

$$BM = \frac{I_t}{\nabla}$$

Conhecido o volume do casco submerso, e consequentemente a geometria da área da superfície de linha d'água, podemos determinar o valor de BM, e a posição transversal do centro de carena KB.

APÊNDICE B: Prova de Inclinação

O objetivo desta prova é a determinação da posição vertical do centro de gravidade.

A prova deve ser realizada com a embarcação na condição leve, devem ser removidos todos os equipamentos que não façam parte do equipamento fixo da embarcação, os tanques devem estar vazios sempre que possível, evitando efeitos de superfície livre, ou totalmente cheios sem bolsões de ar, ou caso apresente superfícies livres, que esta seja perfeitamente possível de ser determinada. Deve-se impedir movimento de massas durante a prova, por exemplo, lanças de guindastes, tampas de escotilha, entre outros.

O ângulo de banda não deve ser maior que $0,5^\circ$ (meio grau) e o trim igual ou inferior a 1% (um por cento) do comprimento entre perpendiculares (L_{pp}).

O local de teste deve ser abrigado e livre de corrente e vento, sempre que possível, de forma a não comprometer a precisão da prova.

Somente pessoas necessárias para a realização da prova devem permanecer na embarcação, na linha longitudinal de centro.

A embarcação deve estar livre para oscilar, amarras e cabos de amarração no dique ou cabos de fundeamento frouxos, escadas e pranchas recolhidas, e ausência de conexões com a terra.

Um tubo deve ser instalado a vante e outro a ré da embarcação, cada qual percorrendo a seção de uma borda a outra, e um pêndulo a meia nau sobre a linha de centro. A partir da seção a ré, massas são colocados, a primeira massa W_1 a bombordo, a segunda massa W_2 a boreste, até a seção de meia nau, igualmente espaçados entre si. A partir da seção de meia nau, a terceira massa W_3 é colocado

a bombordo, e a quarta massa a boreste, também igualmente espaçados, entre a seção de meia nau e a seção a vante. A seção a vante é equidistante à seção a ré em relação à seção de meia nau.

Figura 75 - Disposição de massas – Prova de Inclinação

Os tubos são utilizados para medidas de nível a bombordo e a boreste, a vante e a ré, acoplados a réguas graduadas próximas das extremidades dos tubos, flexíveis e livres de bolhas de ar.

Segue-se sequência de 8 (oito) movimentações de massas de bombordo a boreste, sobre a mesma seção transversal a distâncias conhecidas. A movimentação da massa aplica um momento transversal, e o equilíbrio é estabelecido, e assim mede-se o ângulo de inclinação com o pêndulo a cada movimentação.

As massas a serem movimentados devem provocar um ângulo de banda θ recomendável dentro do intervalo de 1 a 3 graus. Para dimensionar as massas a serem movimentados, utiliza-se a seguinte expressão:

$$W_i = \frac{\Delta \times GM \times \tan \theta}{d}$$

W_i ($i = 1, \dots, 4$) = massa a ser transferida (em toneladas)

d = percurso transversal do peso inclinante (em metros)

GM = altura metacêntrica estimada para a condição de prova (em metros)

Δ = deslocamento estimado para a condição de prova (em toneladas)

Esta expressão é obtida pela igualdade dos momentos de força após o movimento da massa W_i ao longo do percurso d . O empuxo é sempre aplicado na direção do metacentro, logo, não gera conjugado em relação ao metacentro.

Figura 76 - Diagrama de forças e momentos da prova de inclinação clássica

Na condição com ângulo de banda θ , segue a expressão do equilíbrio de conjugados de força:

$$\Delta \times GM \times \sin \theta = W_i \times a \times \cos \theta + W_i \times (d - a) \times \cos \theta$$

$$\Delta \times GM \times \sin \theta = W_i \times d \times \cos \theta$$

$$\Delta \times GM \times \tan \theta = W_i \times d$$

Logo,

$$W_i = \frac{\Delta \times GM \times \tan \theta}{d}$$

A massa do pêndulo de ter no mínimo 5 kg, suspensa por um fio metálico de aço flexível por um ponto de sustentação solidário à embarcação. Deve-se utilizar no mínimo 2 (dois) pêndulos afastados um do outro o máximo possível, no sentido longitudinal da embarcação. Sugere-se uma cuba de óleo onde a massa do pêndulo fica imersa, é o óleo atua como amortecedor da massa do pêndulo.

Os tubos em “U” a vante e a ré também desempenham a função de medida de desnível, após a movimentação dos pêndulos. Devem ser transparentes e recomenda-se diâmetro maior nas extremidades.

Figura 77 - Medição dos desvios por meio de tubo em “U”

Um termômetro é usado para medir a densidade da água no início da prova e leitura de calados são feitas para utilização das curvas hidrostáticas a partir do calado correspondente, tais como:

- Deslocamento Δ
- Posição longitudinal do centro de carena (LCB)

- Momento para trimar1 (um) centímetro
- Posição vertical do metacentro transversal (KM)

APÊNDICE C: Prova de Inclinação alternativa

De forma alternativa à sugestão da prova de inclinação constante na NORMAM-02/DPC, seção 6, sugere-se a utilização de uma caixa d'água, dessas encontradas nas lojas de materiais de construção e de baixo custo, a ser colocada a bombordo ou boreste, dotada de uma mangueira de enchimento de água, acoplada a bomba de deslocamento positivo que desloca fluido da entrada para a saída em quantidades fixas (finita) de volume de fluido por vez, e dotada de medidor de volume. A bomba succiona água do rio e enche a caixa d'água até o nível calibrado.

A caixa dá água deve ser posicionada de forma a se conhecer a distância do seu centro geométrico à linha de centro longitudinal da embarcação.

Figura 78 - Localização da caixa d'água na embarcação

Mede-se a temperatura da água para calcular a densidade da água do rio. Conhecido o volume de água bombeado e o centro volumétrico da água, determina-se o ponto de aplicação do peso W_a acrescido do peso da caixa d'água W_c .

Conhecidas as dimensões internas da caixa d'água, calcula-se o volume e o centro volumétrico da água bombeada.

Figura 79 - Superfície da água dentro da caixa d'água

Após a adição de água, na posição de equilíbrio, a superfície interna da água dentro da caixa d'água estará perpendicular à direção da força gravitacional, conforme mostra a Figura 78. Os níveis da água a_1 , a_2 , a_3 e a_4 junto aos quatro cantos da caixa d'água deverão ser medidos, bem como o comprimento CL e largura CH da caixa d'água. A medição dos níveis de água pode ser obtida no caso com a utilização de ondômetros capacitivos ou resistivos.

Logo, o centro volumétrico da água bombeada estará na intersecção de duas retas, cada qual contém o par de pontos que unem o centro do trapézio formado em lados opostos.

A caixa d'água deverá estar graduada nas quatro paredes internas, e o ponto de aplicação da resultante $W_a + W_c$ é calculado da seguinte forma:

Figura 80 - Diagrama de forças e momentos da prova de inclinação proposta

Na condição com ângulo de banda θ , segue a expressão do equilíbrio de forças:

$$\Delta \times GM \times \sin \theta = (W_a + W_c) \times a \times \cos \theta$$

Logo,

$$W_a + W_c = \frac{\Delta \times GM \times \tan \theta}{a}$$

Partindo do valor de GM de projeto, pode-se dimensionar o volume de água a ser bombeado, bem como a distância do centro geométrico da caixa d'água contendo água bombeada ao plano de centro da embarcação.

Procede-se com o enchimento de volumes de água progressivos e assim obter uma série de valores de GM (altura metacêntrica) para cada ângulo de banda medido, e construir uma tabela de pontos da curva de estabilidade estática, conforme tabela:

		Coluna 3				Coluna 7
Ângulo de banda inicial	Ângulo de banda final	Diferença	Peso da água bombeada	Ponto de aplicação de Peso ($W_a + W_{lc}$)	GM Altura metacêntrica	GZ Braço de Endireitamento
θ_1	θ_2	$\theta = \theta_1 - \theta_2$	W_c	a	$\frac{a \times (W_a + W_c)}{\Delta \times \tan \theta}$	$GM \times \sin \theta$
...	...	...	...	...	...	...

Figura 81 - Dados de entrada da prova de inclinação proposta

Se o ensaio sofrer um intervalo suficiente para variação da temperatura da água, novo cálculo de densidade da água bombeada deverá ser realizado.

Os pares de pontos da coluna 3 e coluna 7 são utilizados para traçar a curva de estabilidade estática.

Cálculo da posição vertical do centro de gravidade

A posição vertical do centro de gravidade é calculada pela seguinte fórmula:

$$KG = KM - GM_0 - GG_0$$

KG = posição vertical do centro de gravidade (em metros)

KM = altura metacêntrica transversal (em metros)

GM_0 = altura metacêntrica inicial determinada na prova (em metros)

GG_0 = correção devido ao efeito de superfície livre (em metros)

O cálculo da altura metacêntrica (KM) é obtido pelas médias das alturas metacênticas obtidas em cada movimento.

APÊNDICE D: Proposta de tratamento de sinistros decorrentes de emborcamento

Avaliação de risco na estabilidade estática

A ocorrência de um sinistro decorrente de emborcamento é acompanhada por um conjunto de evidências tangíveis, que são utilizadas para avaliar as causas do sinistro. A proposta é a elaboração de uma metodologia de abordagem e de um roteiro de avaliação.

Metodologia de abordagem

A avaliação de risco na estabilidade estática contempla os componentes que podem apresentar risco. O sinistro em si é a realização do risco. Logo, fontes de risco devem ser identificadas. Essencialmente, o ser humano utiliza a tecnologia no meio ambiente. Os passageiros e tripulação (ser humano) utilizam as embarcações (tecnologia) no meio navegável (meio ambiente).

O histórico escolar e profissional da tripulação indica o grau de preparo do manuseio da embarcação nas condições de contingência, como mal tempo, navegação em águas rasas, correnteza e vento, e nas condições normais, como operação do sistema de leme, motorização, e condução e instrução aos passageiros durante a navegação.

O meio navegável determinado pelas rotas de operação da embarcação prevê suas condições de tempo e navegabilidade.

A embarcação apresenta características geométricas de casco, arranjo geral, sistema de propulsão hélice-motor e conjunto de leme que impactam diretamente na sua capacidade de enfrentar ambientes e riscos combinados.

Figura 82 - Componentes do sistema em foco

Segue o diagrama da metodologia sugerida:

Perícia local:

Relatório Final:

Figura 83 - Diagrama da metodologia sugerida para tratamento de sinistros

Roteiro de avaliação

Análise de Licença de Construção e Documentos Acessórios

O conjunto de Normas da Autoridade Marítima – NORMAM 2 – determina as regras para embarcações empregadas na navegação interior.

A Licença de Construção é fundamentada nos documentos acessórios, entregues pelo armador, a citar principalmente:

- i. ART – Anotação de Responsabilidade Técnica referente ao projeto/construção da embarcação;
- ii. Memorial Descritivo;
- iii. Plano de Arranjo Geral;
- iv. Plano de Linhas;
- v. Curvas Hidrostáticas e Cruzadas;
- vi. Plano de Segurança;
- vii. Plano de Arranjo de Luzes de Navegação;
- viii. Plano de Capacidade;
- ix. Plano da Seção mestra e Perfil Estrutural;
- x. Relatório de Prova de Inclinação, Relatório de Medição de Porte Bruto;
- xi. Folheto de Trim e Estabilidade Definitiva.

Estes documentos supra mencionados servem de base para determinar a área de navegação na qual a embarcação pode e fica restrita a operar, no caso, *Área de Navegação Interior 1*. No decorrer da vida útil da embarcação, qualquer alteração que a embarcação seja submetida pode implicar na necessidade de uma Licença de Alteração ou mesmo de Reclassificação.

No instante do naufrágio, entende-se de boa fé que a embarcação se encontrava em conformidade plena com as informações constantes nos documentos supra mencionados. Qualquer indício de inconformidade é indicativo da necessidade de reabertura do processo.

Figura 84 - Análise de Conformidade com Normam2 no instante do evento

- Deve-se efetuar esta análise de conformidade, no estado da embarcação no instante do naufrágio (evento);
- Deve-se disponibilizar cópia destes documentos acessórios supra citados;
- Deve-se verificar se não houve reclassificação e/ou alteração da embarcação junto às autoridades marítimas.

Criação e Análise de Cenários

O tratamento dos dados oriundos dos depoimentos das testemunhas implica na criação de cenários que devem ser analisados sob a perspectiva *essencialmente* técnica. Cada depoimento atribui às variáveis valores que, ao serem combinados *por testemunho*, ou combinados de forma cruzada (entre os testemunhos), permite a criação de cenários. Estas variáveis são utilizadas no cálculo da velocidade média da embarcação, influência do efeito de águas rasas, efeito da força dos ventos, e no estudo de estabilidade estática,

Os valores declarados por testemunha e perícia local serão utilizados em conjunto com os dados coletados a partir da documentação original.

Efeito da Velocidade média			T1	T2	...	TN
Hora da Saída	declarado	HS				
Hora do Ocorrido	declarado	HO				
Coordenadas do local do acidente	declarado					
Velocidade Média do percurso	calculado	VS				
Potência de Freragem ou Desaceleração	calculado	PF				
Influência de efeito de águas rasas sobre a borda livre						
Distância da Margem	declarado	DM	●			
Profundidade Média do Rio (segmento da desaceleração)	apurado	HM				
Aproamento (paralelo ao rio)	declarado			●		
Efeito da Força dos Ventos						
Velocidade dos Ventos	apurado	VV				
Direção dos Ventos	declarado	DV	●	●		
Área Vélica	calculado	AV				
Força dos Ventos	calculado	FV				
Direção do Emborcamento	declarado					
Curva de Estabilidade Estática por Cenário						
Plano de Linhas	apurado				●	
Arranjo Geral	apurado					
Curvas Hidrostáticas	apurado		●			
Localização da testemunha	declarado					●
Distribuição de Pesos e Centros	calculado					
Efeito de Superfície Livre						
Localização do tanques	apurado		●			

Figura 85 - Tabela de Variáveis

Deve-se criar a Tabela de Variáveis, na qual as colunas T1, T2 a TN correspondem aos dados adquiridos com base nos relatos de cada testemunha.

Avaliação de Estabilidade

Com base nas informações da (1) Análise de Licença de Construção e Documentos Acessórios e (2) Criação e Análise de Cenários, aplica-se os critérios de estabilidade conforme Normam2 e assim é executada a avaliação de estabilidade.

Deve-se gerar a curva de estabilidade estática e aplicar os critérios de estabilidade conforme Normam2, com base na documentação original e análise de cenários para condições de calado definidas.

Segue, a título elucidativo, os Critérios de Estabilidade para a Área de Navegação 1, sendo esta a área de navegação autorizada para a embarcação sob análise conforme Licença de Construção apresentada.

- a) O ângulo de equilíbrio estático da embarcação (θ_1), quando submetida à ação isolada do acúmulo de passageiros em um bordo, do vento, da manobra do giro ou do reboque (quando aplicável) deve ser menor ou igual ao ângulo de imersão do convés na condição de carregamento considerada ou 15° , o que for menor
- b) A área compreendida entre a curva de estabilidade estática (CEE) e as curvas dos braços de emborcamento devido ao acúmulo de passageiros em um bordo, ao vento, a manobra de giro ou ao reboque (quando aplicável), até o ângulo de alagamento (θ_f) ou 40° , o que for menor, (área A2 indicada na figura 6-13) deverá ser maior ou igual que a área sob a curva dos braços de emborcamento antes da interseção com a curva de estabilidade estática (área A1 representada na figura 6-13)
- c) A altura metacêntrica inicial (GMo) deverá ser maior ou igual a 0,35m;
- d) Ângulo de alagamento maior ou igual a 25° ; e

Figura 86 - Critério de estabilidade para embarcações da área1 (DELEGACIA DE PORTOS E COSTAS, 2012)

A curva de Estabilidade Estática é o instrumento principal para avaliar a estabilidade da embarcação. Para o cálculo desta curva, é necessário o Plano de Linhas, Arranjo Geral, Curvas Hidrostáticas, Prova de Inclinação (posição do centro de gravidade), entre outros, e com base nestes documentos acessórios, para determinadas condições de calado, pode-se determinar o ângulo crítico a partir do qual a embarcação emborca.

A embarcação em equilíbrio, assumida com ângulo de banda nulo indica que o ponto de aplicação da força gravitacional (G) e da força de empuxo (B) estão na mesma linha, esta perpendicular à linha d'água. Forças externas aplicadas ao sistema embarcação decorrentes da ação do vento, deslocamentos súbitos de massas significativas transversais ou longitudinais, queda de pressão sob o fundo da embarcação devido ao efeito de águas rasas ou mesmo efeito de superfícies livres em tanques contenedores de massas significativas de líquidos, podem deslocar a posição do centro de gravidade, e assim gerar um braço de endireitamento GZ. Este braço de endireitamento, multiplicado pela força gravitacional, gera um momento de endireitamento.

As figuras abaixo ilustram os efeitos do ângulo de inclinação Θ sobre o braço de endireitamento, ilustrados na curva de estabilidade estática (GZ em função do ângulo Θ):

Figura 87 - Braço de Endireitamento GZ para ângulo $\Theta_1 > \Theta$

Se o ângulo Θ for muito elevado, o braço de endireitamento GZ passa a ser negativo (cruzamento da curva de estabilidade com o eixo das ordenadas) e a embarcação emborça.

Efeito da elevação da posição vertical do centro de gravidade

As embarcações fluviais originais podem sofrer alterações de uso durante a sua operação. A colocação de cargas ou construção de pavimentos acima do convés, em desacordo com o projeto original, acabam por elevar o centro de gravidade.

As figuras abaixo ilustram o efeito da elevação do centro de gravidade sobre a curva de estabilidade estática. Observa-se que a área sob a curva de estabilidade diminui. Esta área sob a curva indica os trabalhos dos momentos de restauração da embarcação à posição de equilíbrio.

Figura 88: Redução da área sob a curva de estabilidade devido à elevação do centro de gravidade.

Efeito da ação dos ventos

Quando o vento começa a soprar de repente, a energia cinética absorvida pela estrutura enquanto aderna em busca de nova posição de equilíbrio pode ser suficiente para fazê-la ultrapassar a posição de equilíbrio e continuar adernando até emborcar.

Consequentemente, se os trabalhos dos momentos de restauração não forem suficientes (devido à elevação do centro de gravidade), para retornar a embarcação

à posição de equilíbrio, e forem sejam menores que a energia cinética absorvida pela embarcação devido à ação dos ventos, a embarcação emborca.

O efeito da força dos ventos é avaliado pela quantidade energia cinético que é absorvida pela estrutura. Esta energia é absorvida pela área velica, definida pela área projetada da embarcação no plano ortogonal à direção dos ventos. Conforme relatos das testemunhas e documentos oficiais das condições meteorológicas no local e momento do naufrágio pode-se avaliar este efeito.

Velocidade dos Ventos	apurado	...
Direção dos Ventos	declarado	...
Área Vélca	calculado	...
Força dos Ventos	calculado	...
Direção do Emborcamento	declarado	...

Figura 89 - Área vélica

Há fatores (exemplo: altura, peso) que podem indicar que a embarcação não possuía estabilidade para enfrentar ventos fortes. Deve-se efetuar o estudo da ação dos ventos sobre a embarcação, com o uso da curva de estabilidade estática para condições de calado definidas.

Influência do efeito de águas rasas sobre a borda livre

A distância da embarcação às margens no local do acidente pode configurar uma situação de águas rasas. O escoamento da água do rio sob a embarcação tende a acelerar nesta configuração e consequentemente, uma queda súbita de pressão

hidrodinâmica (Bernoulli) pode ocorrer. Neste caso, a embarcação pode aumentar o calado, e ocasionar a entrada de água no convés, e alagamento. Devem-se avaliar as profundidades do rio e as condições de calado no local do acidente.

Prova de Inclinação

A posição do centro de gravidade pode ser apurada através da prova de inclinação após o acidente, conforme procedimento descrito na Normam 2 - Seção VI. A posição do centro de gravidade é crítica para determinação das curvas de estabilidade estática após o acidente. Deve-se realizar a Prova de Inclinação imediatamente após acidente.

Critérios de estabilidade estática - Regras nacionais

O conjunto de normas da autoridade marítima para embarcações empregadas na navegação interior é conhecido como NORMAM 2/DPC (Normas da Autoridade Marítima - Diretoria de Portos e Costas). Estas normas aplicam-se a todas as embarcações de bandeira brasileira, destinadas à navegação interior, com exceção de embarcações empregadas na atividade de esporte e/ou recreio, a menos onde previsto nas normas específicas para tais embarcações (NORMAM-03); e Embarcações da Marinha do Brasil. As normas pertinentes à estabilidade intacta (seção V da NORMAM 2) e prova de inclinação (seção VI da Normam 2) são objeto de estudo.