

VICTOR HUGO FERNANDES

**MAPEAMENTO DE ESTRUTURAS SUBMARINAS ASSOCIADAS AO
TRANSPORTE DE ÓLEO E GÁS COM VEÍCULO AUTÔNOMO
SUBAQUÁTICO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

F363m
2018
Fernandes, Victor Hugo, 1981-
Mapeamento de estruturas submarinas associadas ao
transporte de óleo e gás com veículo autônomo subaquático /
Victor Hugo Fernandes. – Viçosa, MG, 2018.
xii, 103f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Dalto Domingos Rodrigues.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Estruturas marítimas. 2. Geodesia marinha. 3. Veículos autônomos. 4. Submarinos. 5. Ecobatímetro. 6. Levantamentos hidrográficos. 7. Máquinas de medição por coordenadas. 8. Detectores. 9. Imagens digitais. 10. Redes neurais (Computação). 11. Indústria petrolífera. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 627.98

VICTOR HUGO FERNANADES

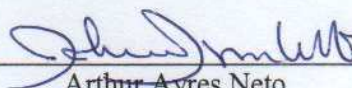
**MAPEAMENTO DE ESTRUTURAS SUBMARINAS ASSOCIADAS AO
TRANSPORTE DE ÓLEO E GÁS COM VEÍCULO AUTÔNOMO
SUBAQUÁTICO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

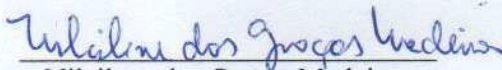
APROVADA: 23 de fevereiro de 2018.



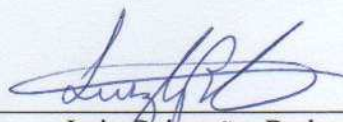
Júlio Cesar de Oliveira
(Coorientador)



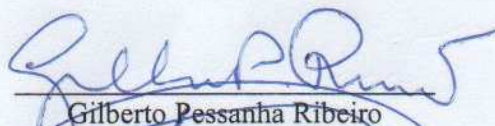
Arthur Ayres Neto
(Coorientador)



Nilcilene das Graças Medeiros
(Coorientadora)



Luiz Guimarães Barbosa



Gilberto Pessanha Ribeiro



Dalto Domingos Rodrigues
(Orientador)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	x
RESUMO.....	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUÇÃO GERAL	1
1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	2
2 HIPÓTESE.....	3
3 OBJETIVOS	3
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	4
CAPÍTULO 1 – CÁLCULO DA INCERTEZA POSICIONAL PARA LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICO COM AUV	5
RESUMO.....	5
ABSTRACT	6
1 INTRODUÇÃO	7
2 SISTEMAS DE REFERÊNCIA.....	8
2.1 Sistema Geodésico Local.....	9
2.2 Sistema de Coordenadas da Plataforma.....	10
2.3 Sistema de coordenadas do USBL.....	11
2.4 Sistema de coordenadas do sensor de levantamento hidrográfico.....	12
3 RELAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS E PROPAGAÇÃO DE VARIÂNCIAS	13
3.1 Coordenadas do USBL e suas incertezas, no SGL	15
3.1.1 Determinação das coordenadas no SGL do centro acústico do USBL.....	15
3.1.2 Qualidade posicional das coordenadas do USBL	17
3.2 Coordenadas do transdutor do AUV e suas incertezas, no SGL	17
3.2.1 Determinação das coordenadas, no SGL, do centro acústico do transdutor do AUV	19
3.2.2 Qualidade posicional das coordenadas do transponder do AUV.....	20
3.3 Coordenadas do centro acústico do sensor de levantamento hidrográfico e suas incertezas, no SGL.....	20

3.3.1 Determinação das coordenadas no SGL do centro acústico do sensor de levantamento hidrográfico.....	20
3.3.2 Qualidade posicional das coordenadas do centro acústico do sensor de levantamento hidrográfico.....	21
3.4 Coordenadas do fundo marinho e suas incertezas no SGL.....	21
3.4.1 Determinação das coordenadas no SGL do fundo marinho	22
3.4.2 Determinação da qualidade posicional do centro de fase do sensor de levantamento hidrográfico.....	23
4 – RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO DAS INCERTEZAS EM LH E DISCUSSÕES	23
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	32
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
CAPÍTULO 2 – REDUÇÃO DE RUÍDOS <i>SPECKLE</i> NO MAPEAMENTO DE ESTRUTURAS LINEARES SUBMARINAS EM IMAGENS DE SONAR DE ABERTURA SINTÉTICA.....	36
RESUMO.....	36
ABSTRACT	37
1 INTRODUÇÃO	38
2 IMAGEM DO SAS	38
3 REDUÇÃO DO RUÍDO <i>SPECKLE</i> E REALCE DE FEIÇÕES LINEARES.....	40
3.1 Filtros adaptativos.....	41
3.2 Contraste pelo histograma (<i>Stretching</i>)	42
3.3 Filtros morfológicos.....	42
3.4 Binarização	43
3.5 Avaliação quantitativa e qualitativa.....	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1 Análise quantitativa referente as técnicas de PDI.....	45
4.1.1 Binarização	45
4.1.2 Filtros adaptativos.....	47
4.1.3 Filtro de contraste pelo histograma (<i>Stretching</i>)	48
4.1.4 Morfologia Matemática	49

4.2 Análise quantitativa das combinações das técnicas de PDI.....	51
4.3 Análise da representatividade das técnicas de PDI.....	53
4.4 Avaliação visual.....	54
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	59
AGRADECIMENTOS	59
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	60
CAPÍTULO 3 – IDENTIFICAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DE DUTOS SUBMARINOS EM IMAGENS DE SONAR DE ABERTURA SINTÉTICA.....	62
RESUMO.....	62
ABSTRACT	63
1 INTRODUÇÃO	64
2 IMAGEM DO SAS	65
3 IDENTIFICAÇÃO DE ESTRUTURAS SUBMARINAS EM IMAGENS DE SAS	66
3.1 Pré-processamento	67
3.2 Extração de feições	68
3.3 Pós-processamento.....	68
3.4 Avaliação dos resultados	69
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	81
AGRADECIMENTOS	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	83
CAPÍTULO 4 – IDENTIFICAÇÃO SEMIAUTOMÁTICA DE VÃOS-LIVRES EM DUTOS SUBMARINOS A PARTIR DE DADOS ADQUIRIDOS COM AUV	84
RESUMO.....	84
ABSTRACT	85
1 INTRODUÇÃO	86
2 LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO COM AUV	87
3 CLASSIFICAÇÃO DE CONDIÇÃO DE VÃO LIVRE	89
3.1 Duto	90
3.2 Seções transversais	91
3.3 Análises de condição de vão livre.....	92
3.3.1 Random forest ou floresta aleatória	93

3.3.2 Redes neurais	94
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	95
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	98
AGRADECIMENTOS	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES GERAIS	102

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 – CÁLCULO DA INCERTEZA POSICIONAL PARA LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICO COM AUV

Figura 1 - Sistemas terrestres de coordenadas.....	9
Figura 2 - Sistema de coordenadas da plataforma (Embarcação/AUV).....	11
Figura 3 - Sistema de coordenadas do transdutor USBL	12
Figura 4 - Sistema de coordenadas do sensor de levantamento hidrográfico.....	13
Figura 5 - Fluxograma metodológico da determinação da qualidade posicional do levantamento hidrográfico com AUV	14
Figura 6 – Coordenadas do <i>us</i> no SGL e suas incertezas	16
Figura 7 – Medidas realizadas pelo USBL	16
Figura 8 – Coordenadas do <i>ca</i> no SGL e suas incertezas.....	19
Figura 9 – Coordenadas do <i>cs</i> no SGL e suas incertezas	21
Figura 10 – Coordenadas de <i>f</i> no SGL e suas incertezas.....	22
Figura 11 – Efeito das incertezas nos ângulos de atitude e nos <i>offsets</i> , nas coordenadas do ponto <i>us</i> , no SGL, em metros.	24
Figura 12 – Efeito das incertezas nos ângulos acústicos e na distância espacial, medidos pelo USBL, nas coordenadas geodésicas locais do ponto <i>ca</i> , em metros – ângulos acústicos iguais a 1 grau e incerteza na distância igual à σR	26
Figura 13 – Efeito do aumento dos ângulos acústicos e da distância espacial nas coordenadas geodésicas locais do ponto <i>ca</i> , em metros.....	27
Figura 14 – Efeito das incertezas nos ângulos de rotação e na distância <i>R</i> , nas coordenadas do ponto <i>ca</i> no SGL, em metros.	28
Figura 15 – Efeito das incertezas nos ângulos de atitude do AUV e nos <i>offsets</i> , nas coordenadas do ponto <i>cs</i> , no SGL, em metros.	29
Figura 16 – Efeito das incertezas nos ângulos de atitude e na distância (<i>D</i>), nas coordenadas do ponto (<i>f</i>), no SGL, em metros.	30

Figura 17 – Incertezas do receptor GNSS até o fundo marinho	32
---	----

CAPÍTULO 2 - REDUÇÃO DE RUÍDOS *SPECKLE* NO MAPEAMENTO DE ESTRUTURAS LINEARES SUBMARINAS EM IMAGENS DE SONAR DE ABERTURA SINTÉTICA

Figura 1 – IM 1: trecho de uma imagem SAS obtida do levantamento hidrográfico a bordo do AUV.	39
Figura 2 – IM2: outro trecho de uma imagem SAS obtida do levantamento hidrográfico a bordo do AUV.	40
Figura 3 – Imagem de referência 1, referente a IM1.	44
Figura 4 – Imagem de referência 2, referente a IM2.	44
Figura 5 – Demonstração do processo de Avaliação.	45
Figura 6 – Perda do objeto x ruído no processo de binarização da imagem IM1.	46
Figura 7 – Perda do objeto x ruído no processo de binarização da imagem IM2.	47
Figura 8 – Resultados dos filtros adaptativos para as imagens IM1 e IM2.	47
Figura 9 – Resultados dos filtros adaptativos para as imagens IM1 e IM2.	48
Figura 11 – Análise dos diferentes níveis (%) de <i>Stretching</i> na IM2.	49
Figura 12 – Análise dos elementos estruturante do filtro morfológicos <i>Tophat</i> IM1. ...	50
Figura 13 – Análise dos elementos estruturante do filtro morfológicos <i>Tophat</i> IM2. ...	50
Figura 14 – Análise de diferentes combinações na imagem IM1.	52
Figura 15 – Análise de diferentes combinações na imagem IM2.	52
Figura 16 – Representatividade das técnicas de PDI na IM1.	53
Figura 17 – Representatividade das técnicas de PDI na IM2.	54
Figura 18 – Resultado da minimização de ruídos <i>speckle</i> e melhora na definição dos dutos da IM1.	56
Figura 19 – Resultado da minimização de ruídos <i>speckle</i> e melhora na definição dos dutos da IM2.	57

Figura 20 – Detalhes dos resultados da minimização de ruídos <i>speckle</i> e melhora na definição dos dutos das IM1 e IM2.	58
--	----

CAPÍTULO 3– IDENTIFICAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DE DUTOS SUBMARINOS EM IMAGENS DE SONAR DE ABERTURA SINTÉTICA

Figura 1 – IMAGEM 1: trecho de uma imagem SAS obtida do levantamento hidrográfico a bordo do AUV.	65
Figura 2 – IMAGEM 2: outro trecho de uma imagem SAS obtida do levantamento hidrográfico a bordo do AUV.....	66
Figura 3- Fluxograma metodológico do mapeamento de estruturas submarinas.	67
Figura 5 - Aplicação da função Histerese.....	69
Figura 6 – Imagem de referência 2 referente a IMAGEM 1.	70
Figura 7 – Imagem de referência 2 referente a IMAGEM 2.	70
Figura 8 – Demonstração do processo de Avaliação.....	71
Figura 9 – Imagem bruta da IMAGEM 1.	72
Figura 10 – Imagem do pré-processamento da IMAGEM 1.....	72
Figura 11 – Imagem da extração de feições da IMAGEM 1.....	72
Figura 12 – Imagem do resultado da extração de feições e pós-processamento da IMAGEM 1.	73
Figura 13 – Imagem bruta da IMAGEM 2.	74
Figura 14 – Imagem bruta e pré-processamento da IMAGEM 2.....	74
Figura 15 – Imagem da extração de feições da IMAGEM 2.....	74
Figura 16 – Imagem do resultado da extração e mapeamento na IMAGEM 2.	75
Figura 17 – Recorte 1 referente aos resultados apresentados nas Figuras 9 à 12.....	77
Figura 18 – Recorte 2 referente ao resultado apresentado na Figura 12 à 15.....	78
Figura 19 – Avaliação do mapeamento na IMAGEM 1.....	79
Figura 20 – Avaliação do mapeamento na IMAGEM 2.....	79

CAPÍTULO 4 – IDENTIFICAÇÃO SEMIAUTOMÁTICA DE VÃOS-LIVRES EM DUTOS SUBMARINOS A PARTIR DE DADOS ADQUIRIDOS COM AUV

Figura 1 – Ilustração de levantamento hidrográfico com AUV	87
Figura 2 – Trecho da imagem do SAS com dutos e trecho em vão livre.	88
Figura 3 – MDS de um trecho da Figura 2 com representação 3D do fundo marinho e do oleoduto.	89
Figura 4 – Fluxograma para classificação de condição de vão livre.	90
Figura 5 – Georreferenciamento da imagem do SAS com MDS.	90
Figura 6 – Sistema de coordenadas, seção transversal, pontos notáveis e os elementos da curva.	91
Figura 7 – Caracterização do vão livre na imagem do SAS.	93
Figura 8 – Rede neural artificial para a classificação de condição de vão livre.	95
Figura 9 – Simulação de condição de vão livre.	97
Figura 10 – Perfil longitudinal para a visualização de vão livre.	98

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1 – Valores de incertezas dos sensores e <i>offsets</i>	31
--	----

CAPÍTULO 2

Tabela 1 – Classes temáticas das imagens.....	43
Tabela 2 – Combinações das técnicas de PDI.	51
Tabela 3 – Disposição de processamento das técnicas de PDI.....	53

CAPÍTULO 3

Tabela 1 – Composição de áreas da IMAGEM 1 e IMAGEM 2.	66
Tabela 2 – Classes temáticas das imagens.....	71

RESUMO

FERNANDES, Victor Hugo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Mapeamento de estruturas submarinas associadas ao transporte de óleo e gás com veículo autônomo subaquático.** Orientador: Dalto Domingos Rodrigues. Coorientadores: Arthur Ayres Neto, Nilcilene das Graças Medeiros e Júlio Cesar de Oliveira.

As indústrias petrolíferas possuem a necessidade e obrigação de inspecionar as instalações submarinas associadas ao transporte de óleo e gás periodicamente para evitar acidentes ambientais. Os veículos autônomos subaquáticos (AUV) têm-se tornado uma opção viável em Levantamento Hidrográfico (LH) devido à excelente estabilidade da plataforma e aos sensores de alta resolução acoplados no veículo e utilizados no mapeamento submarino. Esses sensores geram grandes quantidades de dados para serem analisados, assim torna-se necessário automatizar os processos no intuito de otimizar o tempo de processamento com a melhor exatidão posicional. Dessa forma essa pesquisa tem o objetivo de determinar a qualidade posicional de levantamento com AUV, avaliar quantitativamente e qualitativamente a redução do ruído *speckle* em imagem do SAS, desenvolver metodologia semi-automática para mapeamentos de dutos submarinos e detecção de condição de vão livre. A qualidade posicional foi verificada pela aplicação da propagação das incertezas no modelo matemático de determinação das coordenadas no LH com AUV. Na imagem do SAS foram utilizados filtros morfológicos, filtros adaptativos e *Stretchlim* para reduzir os efeitos do ruído. Os dutos submarinos foram mapeados de forma semi-automática pela metodologia de pré-processamento, redução de ruídos e realce dos alvos, extração de feições e pós-processamento. A classificação de condição de vão livre foi realizada por rede neural e *random forest* a partir da imagem SAS e dos perfis gerados do modelo digital de superfície obtido pelo ecobatímetro. Os resultados mostraram que a incerteza posicional do LH com o AUV é compatível com as especificações de todas as ordens da IHO (2010), porém o ponto crítico está no método de posicionamento acústico realizado com o *Ultra-Short Baseline*. A utilização de técnicas de processamento digital de imagem é uma poderosa ferramenta na redução dos ruídos *speckle* e na imagem do SAS, assim permitindo mapeamento com mais de 80% dos dutos submarinos de forma semi-automatizado. Os métodos de rede neural e *random forest* tiveram resultados similares e satisfatórios para a classificação de condição de vão livre com exatidões globais de 86,8% e 89,9% respectivamente.

ABSTRACT

FERNANDES, Victor Hugo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Mapping of underwater structures associated to transport of oil and gas with autonomous underwater vehicle.** Adviser: Dalto Domingos Rodrigues. Co-advisers: Arthur Ayres Neto, Nilcilene das Graças Medeiros and Júlio Cesar de Oliveira.

The oil industries have the necessity and obligation to inspect the submarine installations associated with the transport of oil and gas periodically to avoid environmental accidents. Underwater autonomous vehicles (AUV) have become a viable hydrographic survey option due to the excellent stability of the platform and the high-resolution (Synthetic Aperture Sonar - SAS, echo sounder multibeam, high definition cameras) submarine mapping. These hydrographic survey sensors generate large amounts of data to be analyzed, so it becomes necessary to automate the processes in order to optimize the processing time with the best positional accuracy. Thus, the goal of this research is to determine the positional quality of the AUV survey, to evaluate quantitatively and qualitatively the reduction of speckle noise in SAS image, to develop semi-automatic methodology for underwater pipeline mapping and free-span detection. The positional quality was verified by the application of the propagation of the uncertainties in the mathematical model of determination of the coordinates in the hydrographic survey with AUV. Morphological filters, adaptive filters and histogram contrast were used to reduce the effects of speckle noise on the SAS image. The submarine pipelines were semi-automatically mapped by the methodology of pre-processing, noise reduction and target enhancement, feature extraction and post-processing. The classification of free span condition was performed by neural network and random forest from the SAS image and the profiles generated from the digital surface model obtained by the echo sounder multibeam. The results showed that the positional uncertainty of the hydrographic survey with the AUV is compatible with the specifications of all orders of the IHO (2010) and critical point is the acoustic positioning performed with the Ultra-Short Baseline. The use of digital image processing techniques is a powerful tool in reducing speckle noise and restoring spatial resolution in the SAS image, thus enabling more efficient and faster automated processing. More than 80% of the subsea pipelines were mapped semi-automated. The methods of neural network and random forest had similar and satisfactory results for the classification of free-span condition with global accuracy of 86,8% and 89,9%, respectively.

INTRODUÇÃO GERAL

Os veículos autônomos subaquáticos (*Autonomous Underwater Vehicles – AUV*) são plataformas subaquáticas operadas sem contato direto com a embarcação, conforme o próprio nome sugere. Paull et al., (2014) afirmam que o desenvolvimento do AUV teve início significativo por volta de 1970, tornando-se uma nova opção de plataforma em levantamentos hidrográficos para infinitas atividades de mapeamento do fundo marinho, incluindo pesquisas oceanográficas, desminagem submarina, coleta de dados batimétricos em ambientes marinhos e ribeirinhos, e na indústria petrolífera.

O levantamento hidrográfico com AUV é realizado por sensores de mapeamento hidrográfico que ficam a bordo do veículo submarino (plataforma). São diversos os sensores que podem estar a bordo do AUV, tais como: Sonar de Abertura Sintética (SAS), câmera fotográfica, filmadora, perfilado subfundo, sensor de hidrocarboneto e ecobatímetro. Segundo Williams et al. (2015) e Zhang et al. (2017), o SAS e o ecobatímetro multifeixes têm sido utilizados com eficácia em inspeção de dutos para fins de transporte de óleo e gás devido à alta resolução desses sensores.

No mapeamento de estruturas submarinas para fins de inspeção com AUV é possível identificar alguns eventos (destroços, setores enterrados ou parcialmente enterrados, vão livres e cruzamento de dutos) pelas imagens geradas pelo SAS e o Modelo Digital de Superfície (MDS) obtido pelo ecobatímetro. Segundo Mai et al. (2016), atualmente, a maioria, se não todos os veículos ROV (*Remotely Operated Vehicle – Veículo Operado Remotamente*), estão equipados com meios de inspeção visual, que em versões modernas consistem em uma câmera digital, cuja imagem é transmitida como um sinal de vídeo analógico ou digital. Para veículos maiores, as fibras ópticas permitem a transmissão de sinais de vídeo de qualidade superior que anteriormente eram realizáveis usando o cabo. O sinal visual é utilizado pelo operador, no caso de um ROV, como ferramenta de inspeção, bem como para orientação e posicionamento do veículo em relação à estrutura. Além disso, segundo Kuhn et al. (2015), a complexidade da tarefa é aumentada pela ação das correntes oceânicas e pelos limites no processo de aquisição de imagens subaquáticas. Portanto, a automação de algumas partes deste processo pode constituir uma melhoria importante em relação aos erros, ao tempo de trabalho e aos custos.

Holland et al. (2016) relatam que a quantidade de informações geradas pelos sensores de levantamento hidrográfico atingiu a era do "*Big Data*". Essa grande massa de dados necessita de processamentos automatizados com a utilização de vários dados simultaneamente para garantir maior precisão e a melhor compreensão do ambiente oceânico. Esta evolução inclui o uso de modelos com melhor representatividade, redução de duplicações e padrões de interoperabilidade.

1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O mapeamento de estruturas submarinas associadas ao transporte de óleo e gás é extremamente importante na verificação da integridade das instalações, prevenção de rupturas dos dutos e outros acidentes ambientais. O mapeamento é feito regularmente em períodos definidos pelos fatores ambientais locais, tipo de material construtivo, vida marinha, tipo de solo, proprietário do duto, instruções regulamentadoras do país dentre outros fatores. O mapeamento tradicional para a inspeção de estruturas submarinas é realizado geralmente com ROV, com velocidade de deslocamento, cerca de oito vezes menor quanto comparada com AUV. Devido a essa maior velocidade o AUV tornou-se uma nova e ótima opção para mapeamento de estruturas submarinas (ALBIEZ et al., 2015; HOONSUWAN et al., 2016; RICKETTS et al., 2017).

As imagens geradas a partir de levantamento hidrográfico com SAS são muito ruidosas devido a técnica em desenvolvimento e ao meio de propagação do sinal acústico. Outro fator relevante é o alto custo de aquisição dessas imagens e a carência na disponibilidade desses dados para pesquisa, dessa forma, pesquisas relacionadas a esse tema são pouco investigadas dentro do Processamento Digital de Imagem (PDI).

O desenvolvimento de técnicas e algoritmos na identificação de eventos em estruturas submarinas associados ao transporte de óleo e gás por imagem de SAS e MDS é possível por interpretação visual, mesmo com a baixa qualidade da mesma. O treinamento computacional e a geração de algoritmos para a identificação de padrões em imagens de SAS podem permitir a automatização dos processos para a identificação de eventos em estruturas submarinas.

2 HIPÓTESE

A identificação e posicionamento, bem como suas incertezas, de eventos em estruturas submarinas associadas ao transporte de óleo e gás é possível por imagens acústicas do SAS e MDS, a bordo do AUV, por métodos automatizados ou semi-automatizados, com a utilização de técnicas de Processamento Digital de Imagem (PDI) e algoritmo de propagação de incertezas.

3 OBJETIVOS

Tendo em vista a grande quantidade de informações geradas no levantamento hidrográfico com AUV, essa pesquisa tem os seguintes objetivos:

- Desenvolver, avaliar e aplicar algoritmo de propagação das incertezas até as informações espaciais geradas pelo sensor de levantamento hidrográfico instalado em um AUV;
- Avaliar quantitativamente e qualitativamente a redução do ruído speckle, bem como o aumento de contraste de feições de estruturas lineares submarinas associadas ao transporte de óleo e gás em imagens de SAS com uso de técnicas de realce de imagem;
- Desenvolver uma rotina que torna semi-automático o processamento de imagens de SAS para mapeamento de feições lineares de estruturas submarinas;
- Desenvolver metodologia semi-automática para classificação de condição em vão livre (se o duto está ou não em suspensão), a partir de imagens de Sonar de Abertura Sintética e Modelos Digital de Superfície (MDS) provenientes do levantamento hidrográfico com AUV.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBIEZ, J.; JOYEUX, S.; GAUDIG, C.; HILLJEGERDES, J.; KROFFKE, S., Schoo, C.; ... BRITTO, J. (2015, October). Flatfish-a compact subsea-resident inspection auv. **OCEANS'15 MTS/IEEE Washington** (pp. 1-8). IEEE, 2015

HOLLAND, M.; HOGGARTH, A.; NICHOLSON, J. Hydrographic processing considerations in the “Big Data” age: An overview of technology trends in ocean and coastal surveys. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2016. p. 012016.

HOONSUWAN, P.; TIPSUWAN, Y.; SLANVETPAN, T. Development of a Novel Hybrid AUV System for Pipeline Inspection in Gulf of Thailand. In Offshore Technology Conference Asia. **Offshore Technology Conference**, 2016.

KUHN, V. N.; DREWS, P. L. J.; GOMES, S. C. P.; CUNHA, M. A. B.; da COSTA BOTELHO, S. S. Automatic control of a ROV for inspection of underwater structures using a low-cost sensing. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 37(1), 361-374, 2015.

MAI, C.; PEDERSEN, S.; HANSEN, L.; JEPSEN, K. L.; YANG, Z. Subsea infrastructure inspection: A review study. In **Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS)**, IEEE International Conference on (pp. 71-76). IEEE, 2016.

PAULL, L.; SAEEDI, S.; SETO, M.; LI, H. AUV navigation and localization: A review. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, 39(1), 131-149, 2014.

RICKETTS, L.; ORDONEZ, C. Project Cost Reduction and De-Risking with Large-AUVs for Hydrographic and Pipeline Surveys. In **Offshore Technology Conference**. Offshore Technology Conference, 2017.

ZHANG, W., ZHOU, T., PENG, D., e Shen, J. Underwater pipeline leakage detection via multibeam sonar imagery. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 141(5), 3917-3917, 2017.

WILLIAMS, David P.; HUNTER, Alan J. On the relationship between SAS image resolution and target-detection performance. **OCEANS 2015-Genova**. IEEE, 2015. p. 1-5.

CAPÍTULO 1 – CÁLCULO DA INCERTEZA POSICIONAL PARA LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICO COM AUV

RESUMO

Informações espaciais do fundo marinho são obtidas em sua grande maioria por distintos métodos de levantamento hidrográfico. O levantamento hidrográfico com AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) tem demonstrado agilidade e qualidade na aquisição dessas informações. A qualidade posicional das informações obtidas pelo levantamento hidrográfico com AUV está em função de sensores de posicionamento por satélite, sensores de movimento de atitude, posicionamento acústico, plataforma e sensores de levantamento hidrográfico. Dessa forma, conhecer os modelos matemáticos de determinação das coordenadas e a respectiva propagação das incertezas entre os sensores é necessário para determinar a potencialidade e aplicabilidade do levantamento hidrográfico com AUV. Assim, o objetivo do presente estudo é desenvolver, avaliar e aplicar algoritmo de propagação das incertezas das informações espaciais geradas através de levantamento hidrográfico com AUV. Os resultados mostraram que o ponto crítico do modelo de propagação do levantamento hidrográfico com AUV está no posicionamento acústico realizado com o *Ultra-Short Baseline* (USBL), e considerando a correta configuração de sensores e equipamentos, o levantamento hidrográfico com AUV, atende as especificações de incerteza horizontal de todas as ordens da IHO (2010) em relação de precisão exigida no levantamento hidrográfico.

Palavras-chaves: AUV; USBL; levantamento hidrográfico; modelamento.

ABSTRACT

Spatial information on the seabed is largely obtained by different methods of hydrographic survey. Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) are agile and generate high quality survey data. Positional accuracy of AUVs is based on deployment of a combination of satellite positioning sensors, attitude sensors, as well as subsea acoustic positioning, platform and hydrographic survey sensors. Establishing mathematical models to determine the coordinates and respective propagation of the uncertainties among these sensors is necessary to define the potential applicability of AUV hydrographic surveys. The objective of our study was to develop, evaluate and apply a propagation algorithm for uncertainties associated with the spatial information generated by AUV hydrographic surveys. The results show that the critical components of the propagation model are the acoustic positioning performed via Ultra-Short Baseline. Selection of the correct configuration of sensors and equipment can ensure that AUV hydrographic surveys meet the International Hydrographic Organization's specifications for Total Horizontal Uncertainty (THU) associated with the precision required for Minimum Standards for Hydrographic Surveys.

Keywords: AUV, USBL, Hydrographic Survey, Total Horizontal Uncertainty

1 INTRODUÇÃO

O crescimento constante em exploração mineral, transporte marítimo, gestão de zonas costeiras e gestão do meio ambiente são algumas das áreas que proporcionam maior demanda por Levantamentos Hidrográfico (LH) em grande escala e em águas profundas. A representação do relevo marinho e suas características tem como objetivo auxiliar no planejamento, gestão e exploração das atividades marítimas. IHO (2010) ressalta que a “Hidrografia é a chave para o progresso em todas as atividades marítimas, habitualmente de grande importância econômica”.

O uso de novas tecnologias e otimização de processos em LH é um grande desafio para profissionais e pesquisadores da Geodésia Marinha. As técnicas de mapeamento e processamento de dados geofísicos do fundo marítimo, em comparação com levantamentos terrestres, não são triviais. A eficiência do LH está em função da inovação e aprimoramento tecnológico na área de posicionamento por satélite, sensores de movimento de atitude, sistema inercial de navegação, posicionamento acústico, plataforma e sensores de LH (sonar de abertura sintética, sonar de varredura lateral, ecobatímetro e câmera).

Segundo Wynn et al. (2014), AUVs são veículos não tripulados que normalmente são operados a partir de um navio e podem ser operados de forma independente, podendo atingir até 6.000 metros de profundidade. O mapeamento do fundo marinho pode ser feito por sensores de LH a bordo de um AUV, que teve seu início de desenvolvimento nos anos de 1970, mas só começaram a ser comercializados em 1990 (BREIVIK e FOSSEN, 2009). O avanço tecnológico em diversas áreas contribuiu para o desenvolvimento do AUV, pois possibilitou plataforma de menores tamanho, computadores de baixo consumo de energia e memória computacional com potencial para suportar algoritmos complexos de navegação.

No LH com AUV as coordenadas, na superfície, são obtidas inicialmente por receptores *Global Navigation Satellite System* (GNSS) empregando diferentes técnicas de posicionamento e qualidade posicional (DE PALMA et al., 2017). Nos estudos realizados por Hegrenæs et al. (2010), Elsobeiey e Ahmed (2013), El-Diasty (2015), De Jong et al. (2016) e Ahmed et al. (2017) e De Jong et al. (2016) são apresentados os tipos de serviço de posicionamento GNSS: *Standard Positioning Service*, *Precise Positioning Service*, *Differential GNSS*, *Real-time kinematic GNSS* e *Precise Point Positioning*.

IMCA (2014) e Paull et al. (2014) relatam que os métodos de posicionamento acústicos variam em termos de acurácia, designer e frequência, e irão depender do requerimento comercial e das condições ambientais em que serão realizados. Segundo Melo e Matos (2017) e Zou et al. (2017), os principais métodos são *Long Baseline* (LBL), *Short Baseline* (SBL) e *Ultra-Short Baseline* (USBL). No presente trabalho é utilizado o sistema USBL que possibilita estimar a posição submarina tridimensional de um *transponder* instalado no AUV relativamente a um transdutor montado em uma embarcação de superfície. O transdutor transmite um impulso de interrogação ao *transponder* que responde em seguida com um pulso de resposta. O cálculo da posição é baseado na medição da distância e dois ângulos acústicos (θ_x e θ_y) do transdutor para o *transponder*. Apenas um transdutor a bordo tipo USBL é necessário para estimar esta posição (KONGSBERG MARITIME AS, 2013).

Os movimentos de atitudes nas embarcações, causados pela dinâmica do oceano, devem ser medidos com IMU e girobússula para determinar, com melhor acurácia, a posição do sensor acústico (FELSKI et al., 2016). Philips (2003) afirma que a combinação dos dois ângulos acústicos com três ângulos de atitude (*pitch*, *roll* e *yaw*) irão estabelecer a verdadeira relação posicional entre o transdutor e o *transponder*. O avanço na qualidade da medição dos ângulos de atitude possibilitou dados hidrográficos e geofísicos mais acurados.

A qualidade posicional do LH está relacionada diretamente com a precisão dos equipamentos, de seus posicionamentos e dos modelos matemáticos envolvidos na determinação das coordenadas e na propagação das incertezas. Conforme Hegrenæs et al. (2010), conhecer a qualidade final das coordenadas do LH com AUV é fundamental para definir as aplicações do LH.

O objetivo desse trabalho é desenvolver, avaliar e aplicar algoritmo de propagação das incertezas até as informações espaciais geradas pelo sensor de levantamento hidrográfico instalado em um AUV.

2 SISTEMAS DE REFERÊNCIA

Ao estabelecer um sistema de coordenadas é necessário a materialização da origem, orientação dos eixos e escala de tal forma que todos usuários possam concretamente usar esse sistema (JEKELI, 2012).

2.1 Sistema Geodésico Local

O Sistema Geodésico Local (SGL), Figura 1, é um sistema cartesiano dextrógiro composto por três eixos ortogonais entre si; o terceiro eixo, representado pela letra “ u ”, tem direção coincidente com a normal¹ que passa pela origem (o), tendo o sentido positivo quando aponta para um ponto próximo ao zênite; o segundo eixo, “ n ”, tem direção definida pelo meridiano geodésico que passa pela origem e o sentido positivo é o dirigido para o pólo norte terrestre, *International Reference Pole (IRP)*, definido pelo *International Earth rotation and Reference systems Service (IERS)*; por fim, o primeiro eixo, “ e ”, tem direção perpendicular à u e n , na origem, e o sentido positivo é aquele que torna o sistema dextrógiro, (RODRIGUES, 2002). A origem de um SGL é posicionada, normalmente, no centro da área a ser mapeada, ao longo da normal e em uma altitude definida. A Figura 1 mostra o sistema cartesiano geocêntrico (X, Y, Z), as coordenadas geodésicas do ponto (o), (φ, λ, h), e o SGL (e, n, u) com origem no ponto (o), posicionado na superfície física de altitude h .

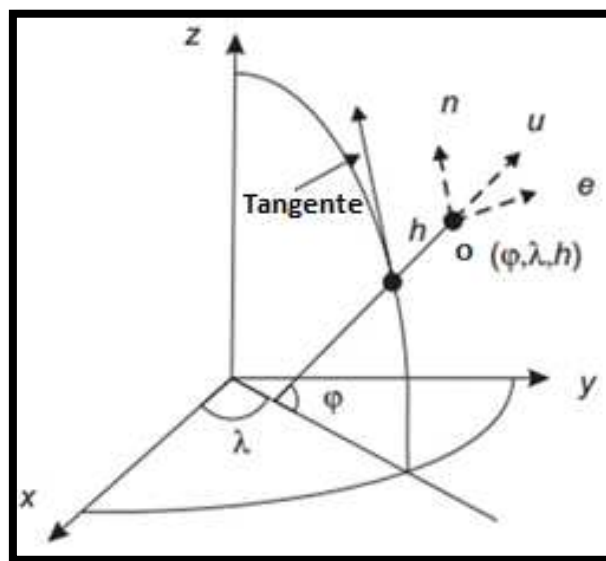


Figura 1 - Sistemas terrestres de coordenadas
Fonte: Leick (2004)

¹ Normal é segmento de reta perpendicular à superfície do elipsoide, cuja direção é muito próxima à da do vetor gravidade ($\vec{g}$). O ângulo que diferencia estas duas direções é conhecido como desvio da vertical e em levantamentos hidrográficos pode ser desconsiderado.

2.2 Sistema de Coordenadas da Plataforma

O Sistema de Coordenadas da Plataforma (SCP) pode se referir ao sistema da embarcação ou a qualquer outra plataforma em que estejam os sensores de levantamento hidrográfico. No caso desse estudo, a definição do sistema de coordenadas é utilizada para a embarcação de superfície e o AUV.

IHO (2010) define o sistema de coordenadas da plataforma como um sistema dextrógiro, com o primeiro eixo, X_p , apontando para a proa, o segundo eixo, Y_p , apontando para estibordo e o terceiro, Z_p , para baixo. Em princípio a origem deste sistema deve estar no centro de gravidade da plataforma (cg). Os ângulos de rotação que tornam este sistema paralelo ao SGL, normalmente, são medidos por um IMU e uma girobússola em relação ao vetor da gravidade ($\vec{g}$) e denominados por *roll*, (r_p), *pitch*, (p_p), e *yaw*, (α_p). O *roll*/balanço corresponde à rotação em torno do eixo X_p e é positivo quando o estibordo abaixa; *pitch*/caturro corresponde à rotação em torno do eixo Y_p e é positivo quando a popa abaixa; e *yaw*/aproamento corresponde à rotação em torno do eixo do Z_p , e positiva se for anti-horária. Portanto, todas as rotações são positivas se anti-horárias. A Figura 2 elucida o SGL (e, n, u), com origem no centro da área mapeada (o); o sistema da embarcação com seus respectivos eixos e os movimentos de atitude da plataforma. Vale ressaltar que os institutos hidrográficos utilizam o Z_p com orientação para baixo para que a sondagem seja positiva. cf é centro de fase da antena GNSS instalada na embarcação.

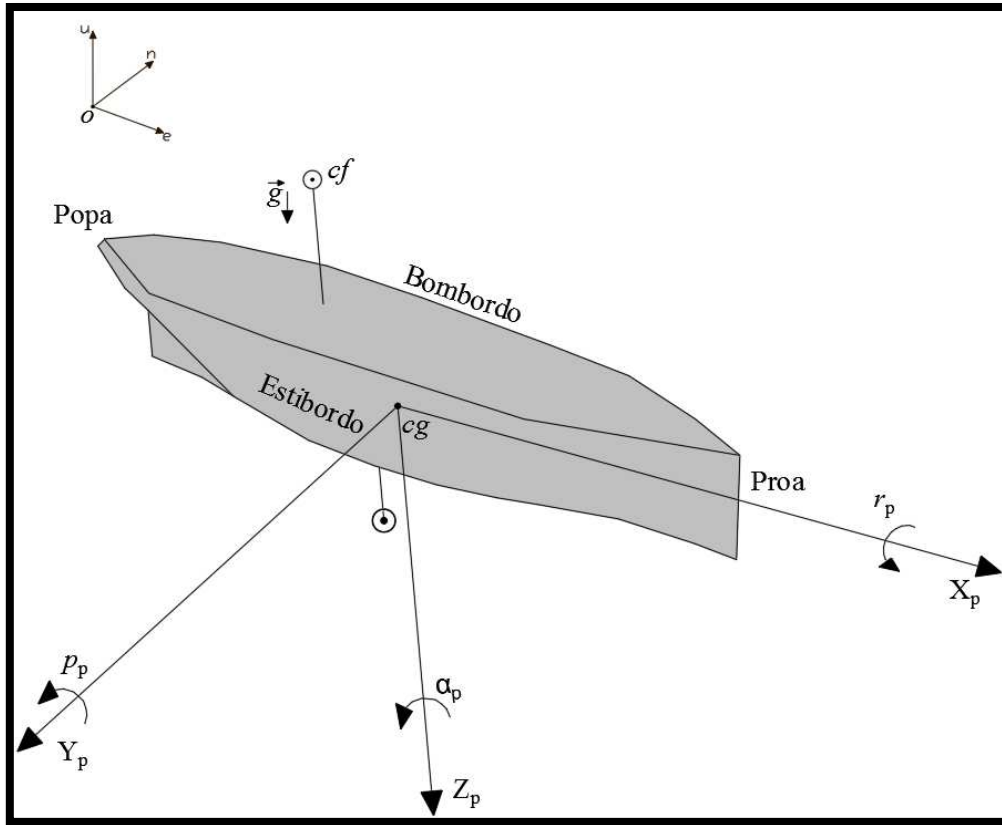


Figura 2 - Sistema de coordenadas da plataforma (Embarcação/AUV)

2.3 Sistema de coordenadas do USBL

O Sistema de coordenadas do USBL, instalado em uma embarcação, é um sistema dextrógiro e com origem no centro acústico do USBL (us), eixo X_u dirigido para a proa da embarcação, Y_u dirigido para estibordo e Z_u apontando para baixo, sendo, portanto, paralelo² ao sistema da embarcação. A Figura 3 mostra o SGL com origem no centro da área mapeada (o), o sistema da embarcação (X_e, Y_e, Z_e), o sistema de coordenadas do USBL, as coordenadas do centro acústico do *transponder* do AUV (ca), no sistema do USBL, $(X_u^{ca}, Y_u^{ca}, Z_u^{ca})$, e as medidas realizadas pelo sistema USBL - ângulos acústicos (θ_x, θ_y) e distância espacial entre os centros acústicos do USBL e do *transponder* do AUV (R). O ângulo acústico θ_x é positivo no sentido anti-horário e θ_y é positivo no sentido horário, os ângulos de rotação da embarcação tornam o sistema de coordenadas do USBL paralelo ao SGL.

² Caso os sistemas não sejam paralelos, as rotações diferenciais devem ser consideradas no modelo matemático que os relacionam.

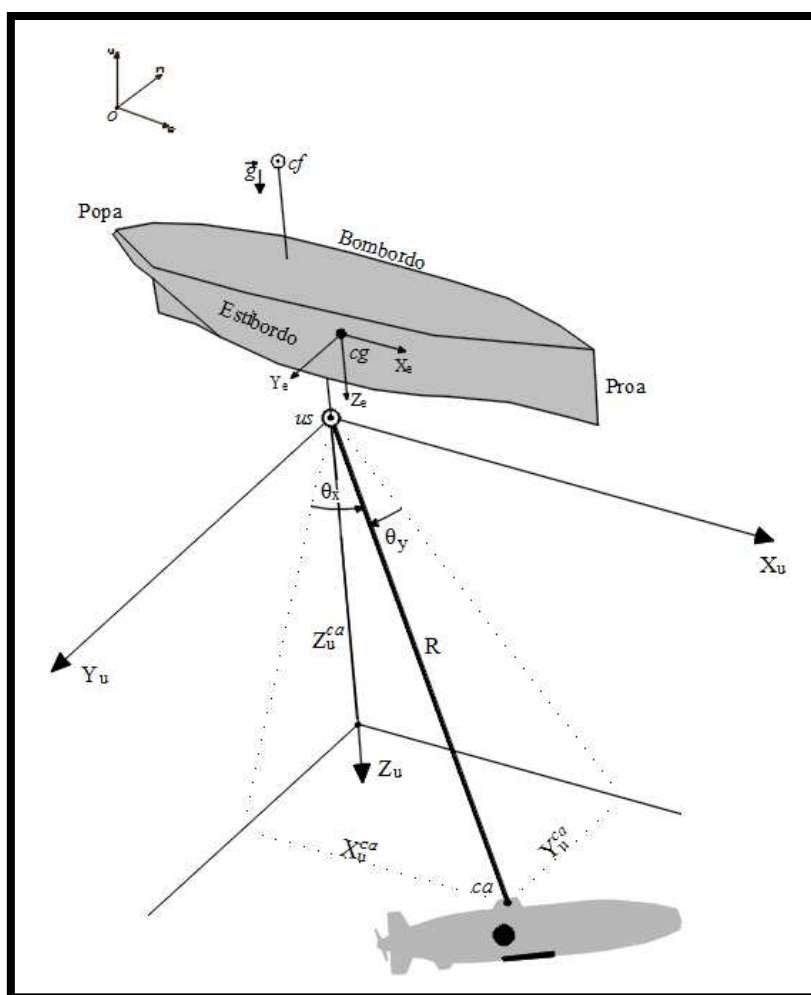


Figura 3 - Sistema de coordenadas do transdutor USBL
Fonte: Adaptado de KONGSBERG MARITIME AS (2013)

2.4 Sistema de coordenadas do sensor de levantamento hidrográfico

O Sistema de coordenadas do sensor de levantamento é um sistema dextrógiro com origem no centro acústico do sensor (cs), Figura 4, o eixo X_s orientado para a proa do AUV, Y_s para estibordo e Z_s apontando para baixo, sendo, portanto, paralelo ao sistema³ de coordenadas do AUV (X_a, Y_a, Z_a). A Figura 4 mostra, além do sistema do sensor, o SGL com origem no centro da área a ser mapeada e o sistema de coordenadas do AUV com origem no centro de gravidade do AUV (ga). Os ângulos de rotação do AUV, medidos em relação ao vetor da gravidade ($\vec{g}$) e que tornam sistemas do AUV e do

³ Caso os sistemas não sejam paralelos, as rotações diferenciais devem ser consideradas no modelo matemático que os relacionam

sensor paralelos ao SGL, são também denominados *roll*, *pitch* e *yaw*, e representados, para o AUV, respectivamente, por (r_a) , (p_a) , e (α_a) .

A Figura 4 mostra também as medidas realizadas pelo sensor - o ângulo acústico (θ), a distância (D) entre o centro acústico do sensor de levantamento hidrográfico (cs) e o fundo marinho (f). O ângulo acústico (θ) é positivo no sentido anti-horário e a distância D é medida no plano Y_sZ_s , pois as visadas são perpendiculares ao eixo X_s .

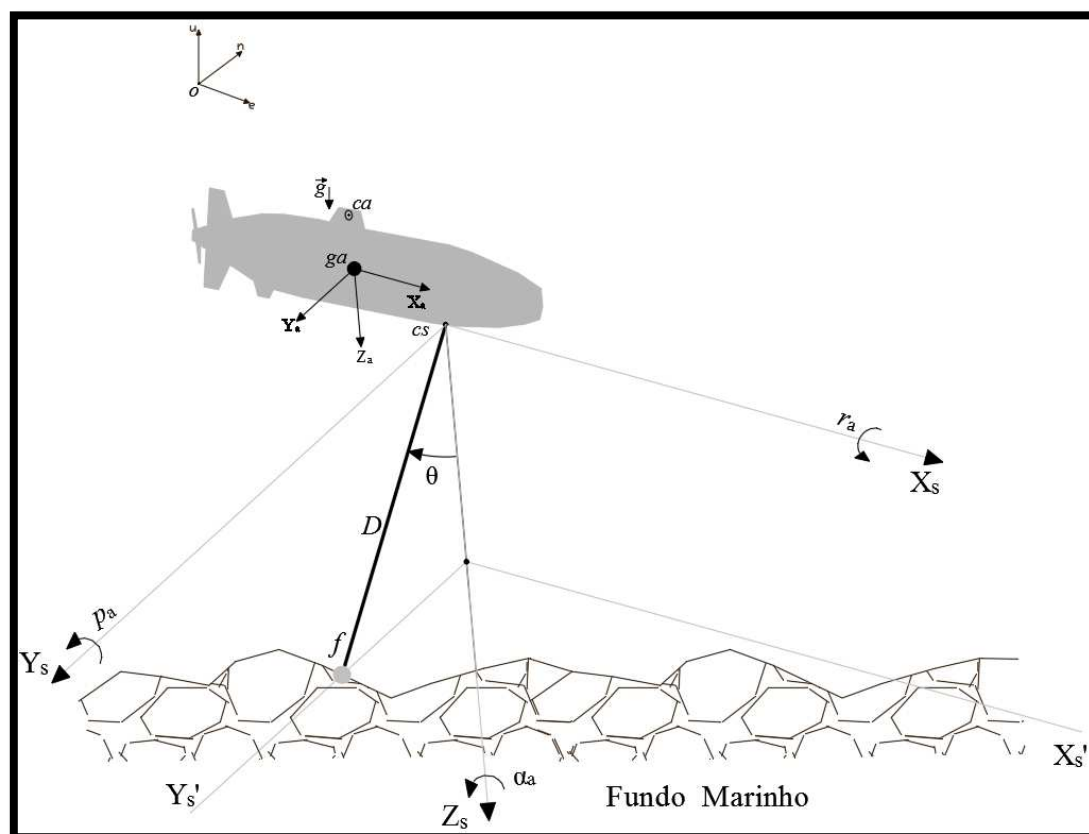


Figura 4 - Sistema de coordenadas do sensor de levantamento hidrográfico

3 RELAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS E PROPAGAÇÃO DE VARIÂNCIAS

O desenvolvimento da metodologia para a determinação da qualidade posicional do levantamento hidrográfico com AUV é descrito em 4 partes com o objetivo de facilitar o entendimento. Cronologicamente as coordenadas são determinadas a partir da posição inicial com receptores *Global Navigation Satellite System* (GNSS), e propagadas desse ponto em diante nessa ordem: transdutor USBL => *transponder* do AUV => sensor de levantamento hidrográfico => fundo marinho. A Figura 6 apresenta as quatro divisões para a determinação e propagação das coordenadas do fundo marinho. No quadro 1, as coordenadas e incertezas são determinadas por GNSS e transportadas para o transdutor

USBL. No quadro 2, as coordenadas do centro acústico do *transponder* do AUV, no sistema do USBL, bem como suas incertezas, são determinadas pelo sistema de posicionamento acústico através da distância inclinada e dos ângulos acústicos entre o transdutor USBL e o *transponder* do AUV. No quadro 3, as coordenadas e incertezas no sistema do sensor de levantamento hidrográfico são transportadas para o sistema do *transponder* do AUV. No quadro 4, as coordenadas e incertezas das informações espaciais do fundo marinho são determinadas a partir das medidas realizadas pelo sensor de levantamento hidrográfico a bordo do AUV.

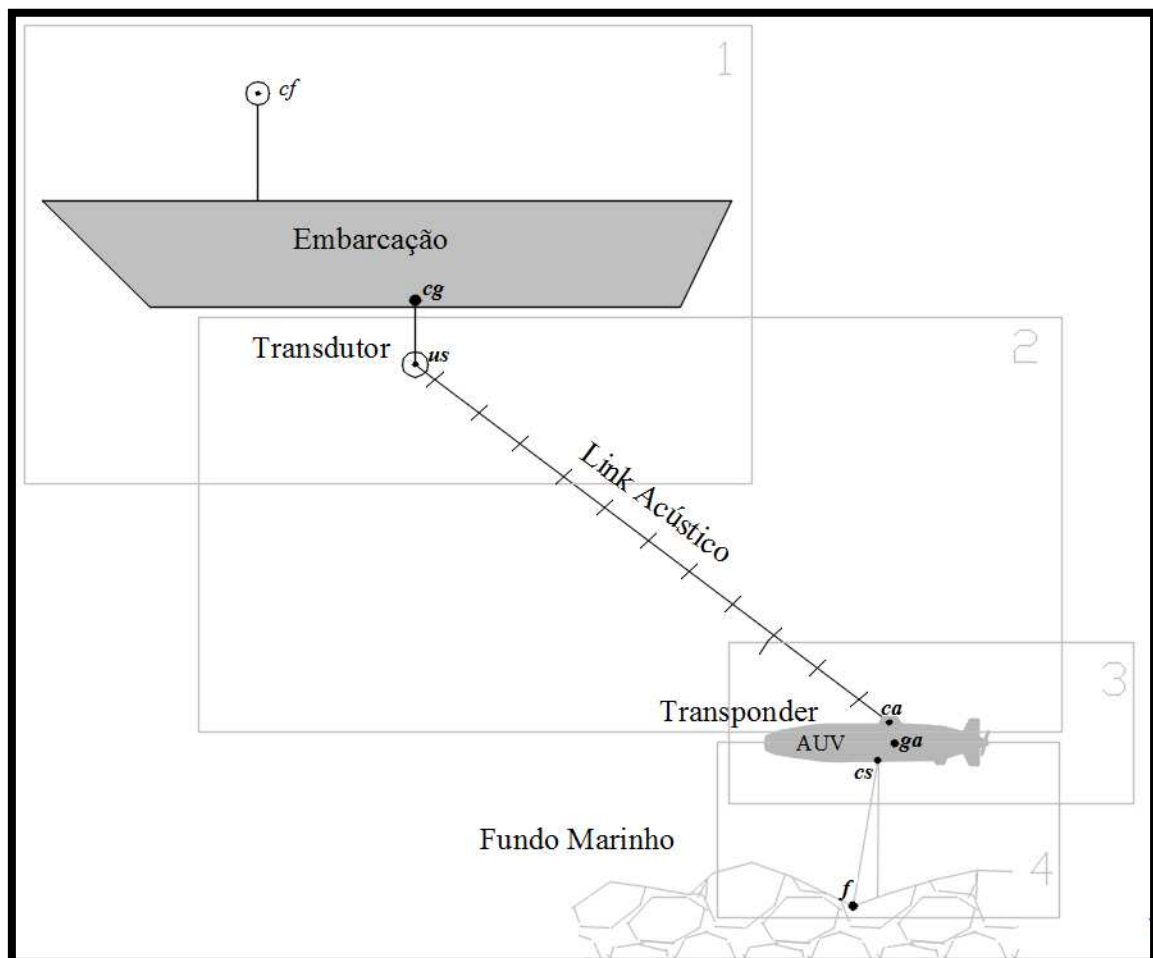


Figura 5 - Fluxograma metodológico da determinação da qualidade posicional do levantamento hidrográfico com AUV

Dado um modelo funcional $Y = F(X)$, o efeito de incertezas das variáveis X no valor determinado Y pode ser estimado aplicando a lei de propagação das covariâncias. As incertezas são, normalmente, quantificadas pela Matriz Variância-Covariância (MVC). Gemael (1994) define a fórmula da lei da propagação das covariâncias pela Equação 1:

$$C_Y = J \cdot C_X \cdot J^T. \quad (1)$$

Onde:

C_Y = matriz covariância de Y ;

J = matriz jacobiana das derivadas parciais de $F(X)$ em relação à X ;

C_X = matriz covariância das variáveis X .

3.1 Coordenadas do USBL e suas incertezas, no SGL

As coordenadas do centro de fase da antena GNSS, cf , instalada na embarcação, no SGL com origem no centro da área a ser mapeada, (e^{cf}, n^{cf}, u^{cf}) , são estimadas em função das coordenadas cartesianas geocêntricas do ponto o (X^o, Y^o, Z^o) e do ponto cf , (X^{cf}, Y^{cf}, Z^{cf}) . As coordenadas da origem do SGL podem ser arbitradas e terão incertezas nulas. Estas incertezas se propagam às coordenadas no SGL e permanecem na mesma ordem de grandeza. As equações de transformação das coordenadas e propagação das incertezas entre o sistema cartesiano geocêntrico e o SGL são descritas com detalhes em Leick (2004).

3.1.1 Determinação das coordenadas no SGL do centro acústico do USBL

A determinação das coordenadas do ponto us , no SGL, (e^{us}, n^{us}, u^{us}) , Figura 6, é realizada em função das coordenadas (e^{cf}, n^{cf}, u^{cf}) , dos *offsets*, no SCE, entre o us e cf , rotacionados pelos ângulos de atitude da embarcação (r_e, p_e, α_e) , aplicando a matriz de rotação resultante do produto $R_3(\alpha_e - 90) \cdot R_2(p_e) \cdot R_1(r_e)$, após inverter os eixos Z_e e Y_e com as matrizes de reflexão R_3 e R_2 , Equação 2. Os *offsets* entre o gn e cf e gn e us são as coordenadas do cf e do us no SCE, $(X_e^{cf}, Y_e^{cf}, Z_e^{cf})$, $(X_e^{us}, Y_e^{us}, Z_e^{us})$, respectivamente. Estas coordenadas devem ser estimadas previamente, após a instalação da antena GNSS e do USBL, empregando técnicas de topografia. Caso o sistema USBL seja instalado logo abaixo do centro de gravidade da embarcação, origem do SCE, $X_e^{us} = 0$ e $Y_e^{us} = 0$.

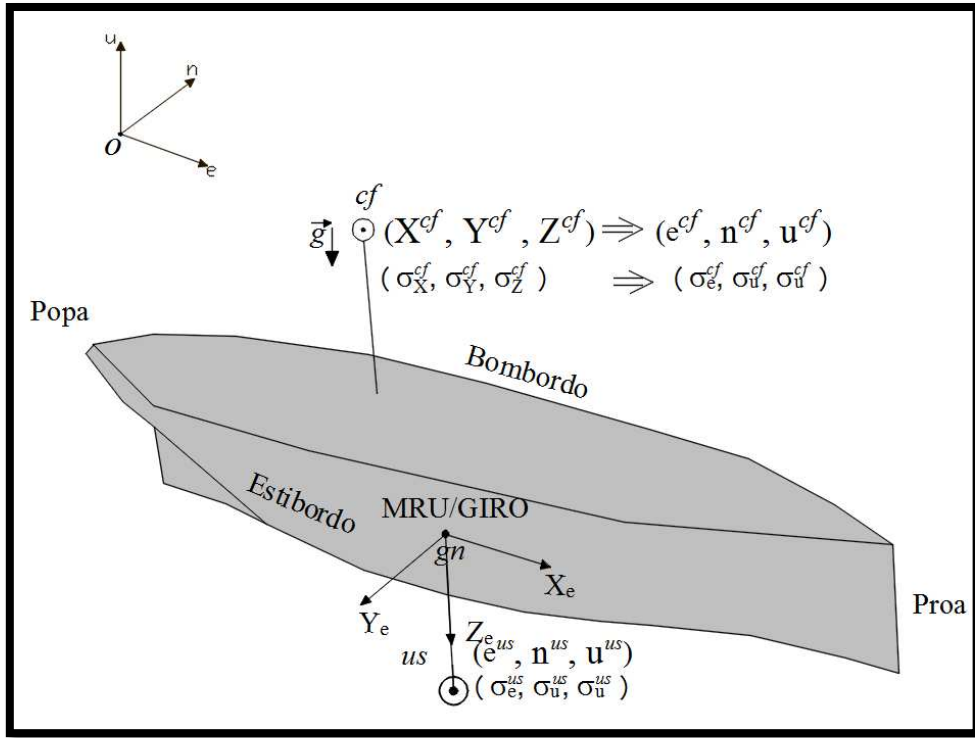


Figura 6 – Coordenadas do us no SGL e suas incertezas

$$\begin{bmatrix} e^{us} \\ n^{us} \\ u^{us} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{cf} \\ n^{cf} \\ u^{cf} \end{bmatrix} + R_3(\alpha_e - 90) \cdot R_2(p_e) \cdot R_1(r_e) \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot \begin{bmatrix} X_e^{cf} - X_e^{us} \\ Y_e^{cf} - Y_e^{us} \\ Z_e^{cf} - Z_e^{us} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Onde as matrizes de rotação e reflexão são:

$$R_3(\alpha_e - 90) = \begin{bmatrix} \sin(\alpha_e) & -\cos(\alpha_e) & 0 \\ \cos(\alpha_e) & \sin(\alpha_e) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$R_2(p_e) = \begin{bmatrix} \cos(p_e) & 0 & -\sin(p_e) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(p_e) & 0 & \cos(p_e) \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$R_1(r_e) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(r_e) & \sin(r_e) \\ 0 & -\sin(r_e) & \cos(r_e) \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$R_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

3.1.2 Qualidade posicional das coordenadas do USBL

A estimativa das incertezas das coordenadas do ponto *us*, no SGL, é realizada aplicando a Equação 1 ao modelo funcional dado pela Equação 2, ou seja,

$$C_{enu_{us}} = J_{eq2} \cdot C_{var_{eq2}} \cdot J_{eq2}^T. \quad (8)$$

Derivando a Equação (2) em relação às variáveis $e^{cf}, n^{cf}, u^{cf}, X_e^{cf}, Y_e^{cf}, Z_e^{cf}, X_e^{us}, Y_e^{us}, Z_e^{us}, p_e, r_e, \alpha_e$ tem-se a matriz jacobiana do modelo funcional dado pela Equação 8, J_{eq2} .

Em todo trabalho, as correlações entre as variáveis não foram consideradas, ou seja, admitiu-se que a matriz das variâncias e covariâncias das variáveis, C_{var} , é uma matriz diagonal. As variâncias das variáveis são expressas em metro e radianos ao quadrado.

3.2 Coordenadas do transdutor do AUV e suas incertezas, no SGL

O posicionamento do *transponder* do AUV é determinado em função das coordenadas do transdutor da embarcação, dos ângulos de atitudes da embarcação, da distância tridimensional e dos ângulos acústicos medidos pelo sistema USBL. A distância é determinada indiretamente pelo intervalo de tempo de ida e volta que o som percorre entre o transdutor e o *transponder* do AUV, multiplicado pela velocidade do som na água. A velocidade do som na água é calculada empiricamente pela medição da condutividade, temperatura e pressão pelo sensor CTD (*Conductivity, Temperature, and Depth*) ou SVP (*Sound Velocity Profile*). Mais informações sobre a determinação da velocidade do som na água podem ser obtidas nos trabalhos de Wilson, (1960) e Chen et al. (1977). No presente estudo assume-se que o som se propaga em meio homogêneo com a mesma velocidade em todas as camadas.

A Figura 7 esquematiza o processo de medição pelo USBL. Nela estão representados os hidrofones (h1, h2, h3 e h4), a distância (R) entre o *transponder* (*ca*) e o transdutor (*us*), as distâncias R1, R2, R3 e R4 entre os hidrofones e o *transponder*, a distância entre os hidrofones h1 e h2 (11), a distância (dl) calculada em função da

velocidade do som na água (v) e da diferença de tempo da chegada da onda acústica nos hidrofones $h1$ e $h2$ ($\Delta t1$).

A medição dos ângulos acústicos ou direção em um sistema USBL baseia-se na comparação das ondas captadas por cada um dos elementos do transdutor multi-elemento do USBL. Considera-se que as ondas que saem do *transponder* e chegam nos elementos do transdutor são paralelas. Calcula-se a diferença de tempo de chegada do sinal a cada um dos elementos para a determinação dos ângulos acústicos (PHILIPS, 2003).

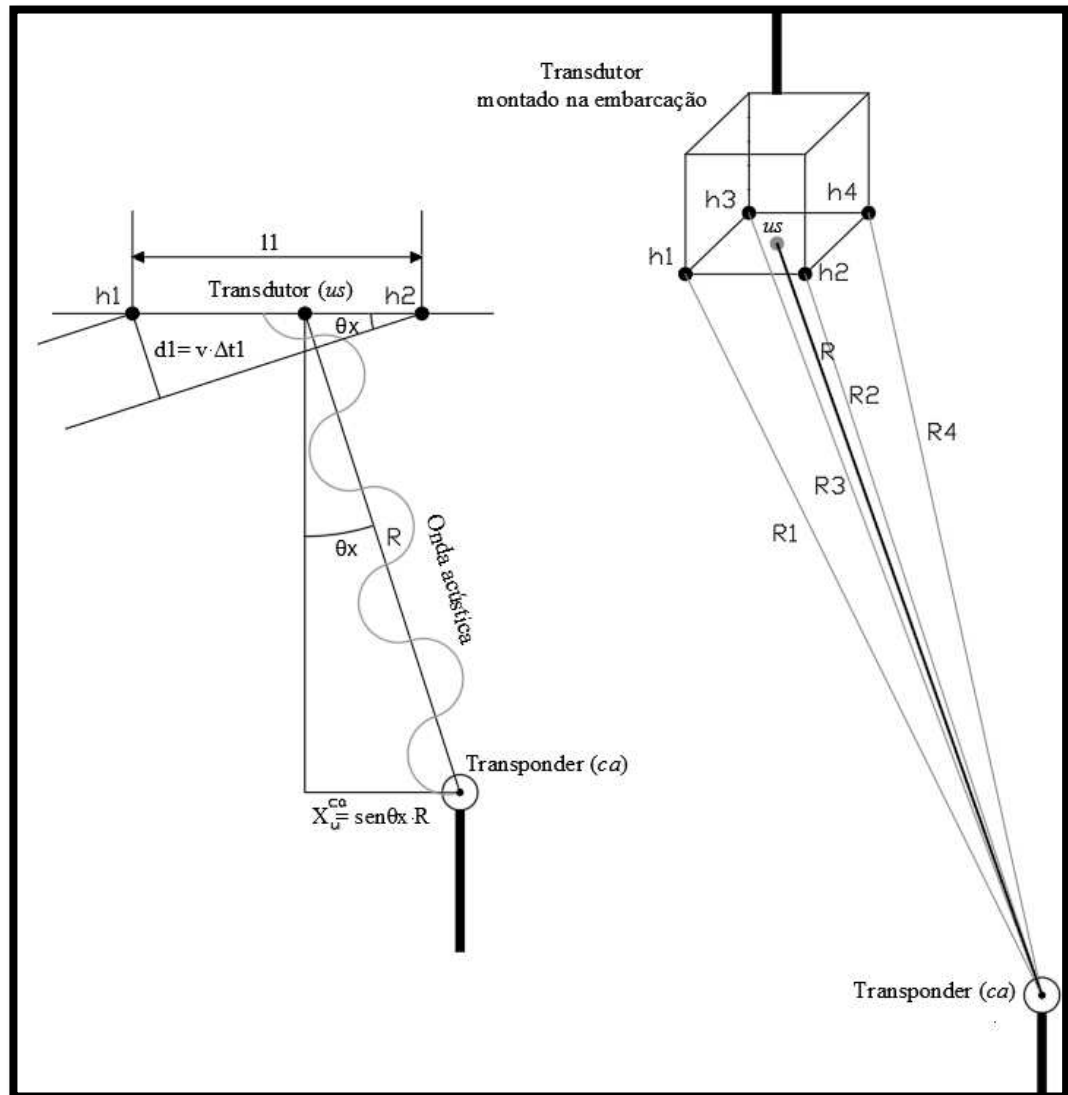


Figura 7 – Medidas realizadas pelo USBL

3.2.1 Determinação das coordenadas, no SGL, do centro acústico do transdutor do AUV

A determinação das coordenadas do centro acústico do transdutor no AUV, ca , (e^{ca}, n^{ca}, u^{ca}) , Figura 8, é realizada em função das coordenadas (e^{us}, n^{us}, u^{us}) , da distância tridimensional (R) e os ângulos acústicos (θ_x e θ_y), Equação 9.

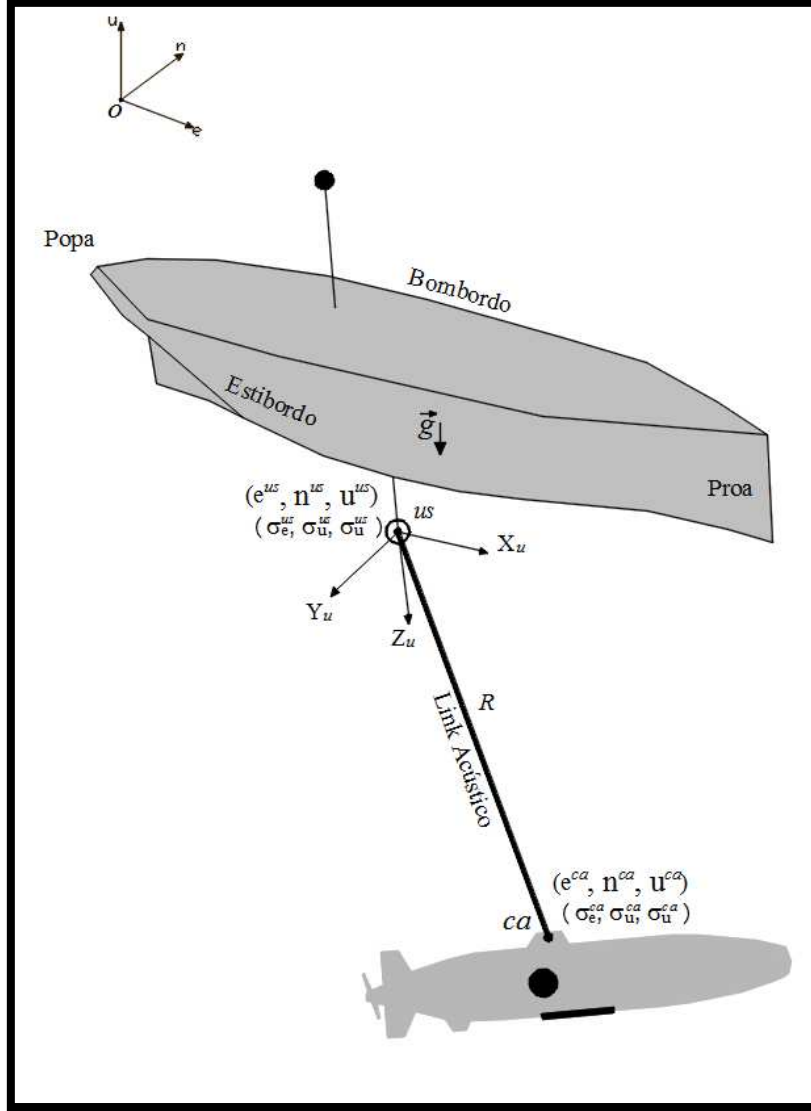


Figura 8 – Coordenadas do ca no SGL e suas incertezas

$$\begin{bmatrix} e^{ca} \\ n^{ca} \\ u^{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{us} \\ n^{us} \\ u^{us} \end{bmatrix} + R_3(\alpha_e - 90) \cdot R_2(p_e) \cdot R_1(r_e) \cdot R_4 \cdot R_5 \cdot \begin{bmatrix} X_u^{ca} \\ Y_u^{ca} \\ Z_u^{ca} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

KONGSBERG MARITIME AS (2013) define as Equações (10) das projeções $X_u^{ca}, Y_u^{ca}, Z_u^{ca}$ como:

$$\begin{bmatrix} X_u^{ca} \\ Y_u^{ca} \\ Z_u^{ca} \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} \text{sen}\theta x \\ \text{sen}\theta y \\ (1 - \text{sen}^2\theta y - \text{sen}^2\theta x)^{\frac{1}{2}} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

3.2.2 Qualidade posicional das coordenadas *do transponder do AUV*

A estimativa das incertezas das coordenadas do ponto *ca*, no SGL, é realizada aplicando a Equação 1 ao modelo funcional dado pela Equação 9, ou seja,

$$C_{enu_{ca}} = J_{eq9} \cdot C_{var_{eq9}} \cdot J_{eq9}^T. \quad (11)$$

Derivando a Equação (9) em relação às variáveis $e^{cf}, n^{cf}, u^{cf}, p_e, r_e, \alpha_e, R, \theta x$ e θy tem-se a matriz jacobiana do modelo funcional dado pela Equação 11, J_{eq10} .

3.3 Coordenadas do centro acústico do sensor de levantamento hidrográfico e suas incertezas, no SGL

Este tópico é análogo ao da seção 3.1, ou seja, análogo à determinação das coordenadas do ponto *us* no SGL, porém, as rotações se referem à atitude do AUV.

3.3.1 Determinação das coordenadas no SGL do centro acústico do sensor de levantamento hidrográfico

A determinação das coordenadas do ponto *cs*, (e^{cs}, n^{cs}, u^{cs}) , Figura 9, é realizada em função das coordenadas (e^{ca}, n^{ca}, u^{ca}) e da soma dos *offsets*, no sistema do AUV, entre o *ca* e *cs*, $(X_a^{ca} + X_a^{cs}, Y_a^{ca} + Y_a^{cs}, Z_a^{ca} + Z_a^{cs})$, rotacionados pelos ângulos de atitude do AUV (r_a, p_a, α_a) , aplicando a matriz de rotação resultante do produto $R_3(\alpha_a) \cdot R_2(p_a) \cdot R_1(r_a)$, Equação 12.

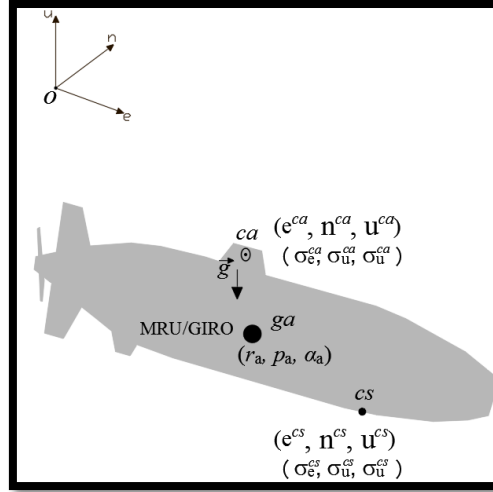


Figura 9 – Coordenadas do cs no SGL e suas incertezas

$$\begin{bmatrix} e^{cs} \\ n^{cs} \\ u^{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{ca} \\ n^{ca} \\ u^{ca} \end{bmatrix} + R_3(\alpha_a) \cdot R_2(p_a) \cdot R_1(r_a) \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot \begin{bmatrix} X_a^{ca} + X_a^{cs} \\ Y_a^{ca} + Y_a^{cs} \\ Z_a^{ca} + Z_a^{cs} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

As matrizes de rotação e reflexão tem a mesma forma das da Equação 8.

3.3.2 Qualidade posicional das coordenadas do centro acústico do sensor de levantamento hidrográfico

A estimativa das incertezas das coordenadas do ponto cs, no SGL, é realizada aplicando a Equação 1 no modelo funcional dado pela Equação 12, ou seja,

$$C_{enu_{cs}} = J_{eq12} \cdot C_{var_{eq12}} \cdot J_{eq12}^T. \quad (13)$$

Derivando a Equação (12) em relação às variáveis $e^{ca}, n^{ca}, u^{ca}, X_a^{ca}, Y_a^{ca}, Z_a^{ca}, X_a^{cs}, Y_a^{cs}, Z_a^{cs}, p_a, r_a, \alpha_a$ tem-se a matriz jacobiana do modelo funcional dado pela Equação 13, J_{eq12} .

3.4 Coordenadas do fundo marinho e suas incertezas no SGL

As coordenadas e incertezas no levantamento hidrográfico (LH) com AUV são as coordenadas e incertezas finais referentes as informações espaciais do fundo marinho. No presente estudo, utiliza-se sensor de LH genérico com o intuito de abranger as diversas características de LH com o modelo de propagação.

3.4.1 Determinação das coordenadas no SGL do fundo marinho

A determinação das coordenadas do ponto f , (e^f, n^f, u^f) , Figura 10, é realizada em função das coordenadas (e^{cs}, n^{cs}, u^{cs}) , dos *offsets* entre f e cs (X_s^f, Y_s^f, Z_s^f) mensurados através do ângulo do sensor de LH (θ) e da distância (D) entre o cs e o f , rotacionados dos ângulos de atitude do AUV, Equação 14.

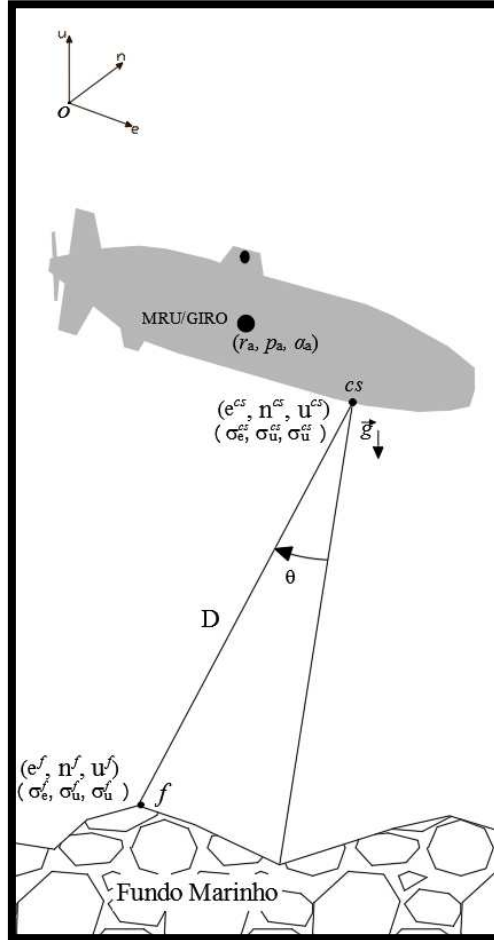


Figura 10 – Coordenadas de f no SGL e suas incertezas

$$\begin{bmatrix} e^f \\ n^f \\ u^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{cs} \\ n^{cs} \\ u^{cs} \end{bmatrix} + R_3(\alpha_a) \cdot R_2(p_a) \cdot R_1(r_a) \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot \begin{bmatrix} X_{cs}^f \\ Y_{cs}^f \\ Z_{cs}^f \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Hare (1995) define o modelo matemático genérico de determinação das coordenadas no fundo marinho, Equação (15).

$$\begin{bmatrix} X_{cs}^f \\ Y_{cs}^f \\ Z_{cs}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ D \cdot \sin\theta \\ D \cdot \cos\theta \end{bmatrix}. \quad (15)$$

3.4.2 Determinação da qualidade posicional do centro de fase do sensor de levantamento hidrográfico

A estimativa das incertezas das coordenadas do ponto S, no SGL, é realizada aplicando a Equação 1 no modelo funcional dado pela Equação 14, ou seja,

$$C_{enu_{cs}} = J_{eq14} \cdot C_{var_{eq14}} \cdot J_{eq14}^T. \quad (16)$$

Derivando a Equação 14 em relação às variáveis $e^{cs}, n^{cs}, u^{cs}, r_a, p_a, \alpha_a, D$ e θ tem-se a matriz jacobiana do modelo funcional dado pela Equação 16, J_{eq14} .

4 – RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO DAS INCERTEZAS EM LH E DISCUSSÕES

O modelo matemático de transporte de coordenadas desde o receptor GNSS até o fundo marinho foi testado com sucesso em ambiente CAD 3D (*Computer Aided Design*). A simulação foi feita com a representação espacial da embarcação, do AUV, do fundo marinho e as medidas de distâncias e ângulos para a determinação da propagação de cada etapa das coordenadas entre os sensores envolvidos. Realizou-se também uma simulação para a propagação das covariâncias de um levantamento hidrográfico com AUV empregando os modelos matemáticos acima descritos. A simulação foi realizada com base nas especificações das precisões nominais dos sensores disponíveis no mercado. A seguir são apresentados os resultados dessas simulações.

A incerteza posicional do levantamento hidrográfico com AUV depende também da qualidade da instalação dos equipamentos, da mensuração da velocidade do som e das condições oceanográficas. A variação da velocidade do som nas camadas da coluna d'água degrada significativamente a qualidade do resultado quando não observada.

A falta de paralelismo entre os sistemas de coordenadas, que ocorre na montagem dos sensores, não foi levada em consideração. Essa correção é feita usualmente pelo *patch-test* (Gueriot et al., 2010).

Serão apresentados somente os resultados da simulação da Incerteza Horizontal Total. Os resultados da simulação da Incerteza Vertical Total não são descritos devido os efeitos da maré não foram levados em consideração. As incertezas estimadas relativas ao LGS e ao THU são dadas pela Equação 17.

$$H = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_n^2} \quad (17)$$

O gráfico da Figura 11 representa o efeito das incertezas em r_e, p_e, α_e e dos *offsets*, $(X_e^{cf} - X_e^{us}, Y_e^{cf} - Y_e^{us}, Z_e^{cf} - Z_e^{us})$, nas coordenadas horizontais (H) e verticais (V), no SGL, do centro acústico do USBL, *us*. Consideraram-se as coordenadas do centro de fase da antena GNSS, *cf*, isentas de incertezas e 5 cm de incerteza para cada *offset*.

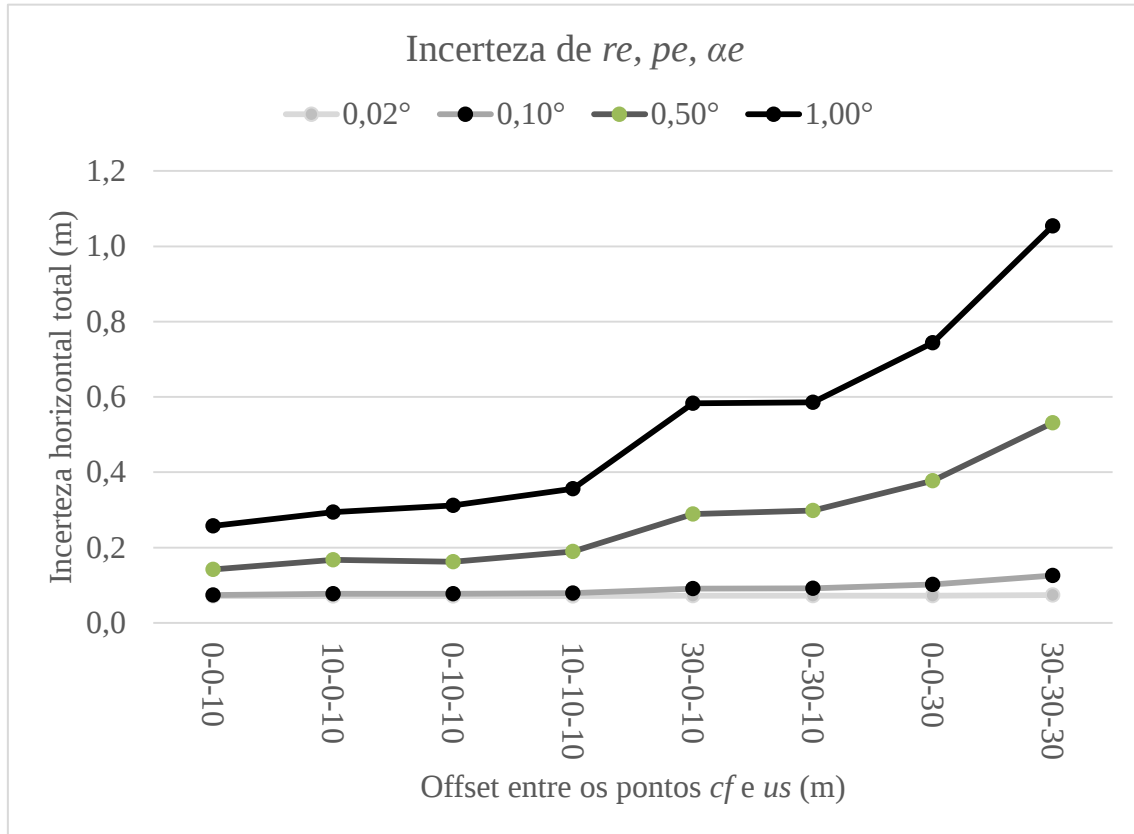


Figura 11 – Efeito das incertezas nos ângulos de atitude e nos *offsets*, nas coordenadas do ponto *us*, no SGL, em metros.

Os resultados da Figura 11 mostram que a incerteza posicional do centro de fase do USBL degrada com o aumento do *offset* em qualquer eixo e com o aumento da

incerteza dos ângulos de atitude. Também pode se observar que o *offset* no eixo Z ($Z_e^{cf} - Z_e^{us}$) tem grande influência na degradação da incerteza horizontal. O *offset* entre o centro de fase da antena GNSS e o transdutor USBL degradam a qualidade posicional diretamente, e o deslocamento do eixo Z tem uma influência considerável na qualidade posicional horizontal. Portanto, ao montar os sensores, os *offsets* entre o centro de fase da antena GNSS e o transdutor USBL devem ser minimizados.

O gráfico da Figura 12 apresenta os efeitos das incertezas nos ângulos acústicos e na distância espacial, medidos pelo USBL, nas coordenadas geodésicas locais do ponto *ca*, em metros. Considerou-se os ângulos acústicos com valores de 1 grau, as coordenadas do ponto *us*, no SGL, sem incertezas, ângulos de atitude (r_a, p_a, α_a) com valores de 1 grau e incerteza de 0,02° e segundo Philips (2003) a incerteza da distância espacial é dada pela Equação 18.

$$\sigma R = R \cdot 0,00017 \quad (18)$$

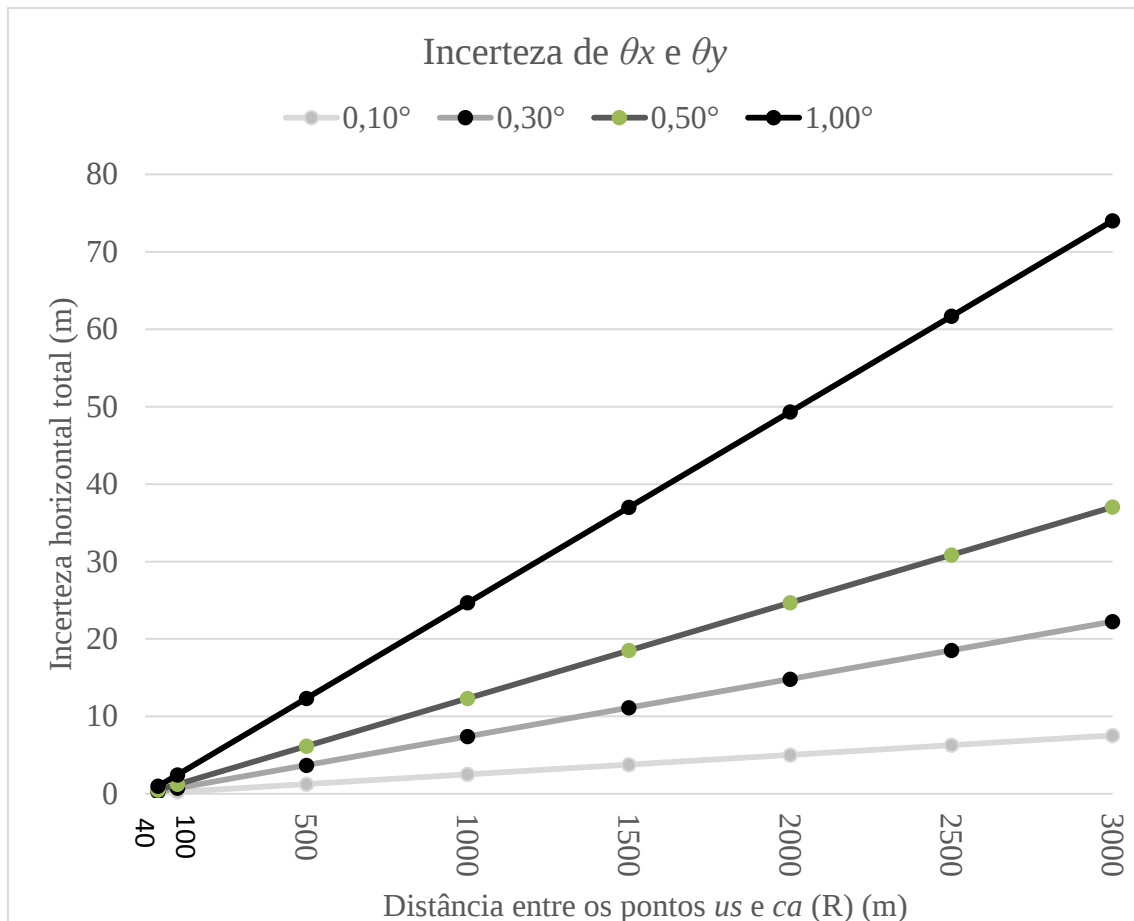


Figura 12 – Efeito das incertezas nos ângulos acústicos e na distância espacial, medidos pelo USBL, nas coordenadas geodésicas locais do ponto *ca*, em metros – ângulos acústicos iguais a 1 grau e incerteza na distância igual à σR .

O gráfico da Figura 12 mostra que a qualidade posicional do centro de fase do *transponder* do AUV degrada com o aumento da distância entre o *us* e o *ca* e também com a incerteza de mensuração dos ângulos acústicos.

O gráfico da Figura 13 apresenta os efeitos do aumento dos ângulos acústicos e da distância espacial nas coordenadas geodésicas locais do ponto *ca*, em metros. Consideraram-se incertezas nos ângulos acústicos iguais a 0,3 graus, as coordenadas do ponto *us*, no SGL, sem incertezas, ângulos de atitude (r_a, p_a, α_a) com valores de 1 grau e incertezas de 0,02° e incerteza da distância espacial (σR) = $R \cdot 0,00017$.

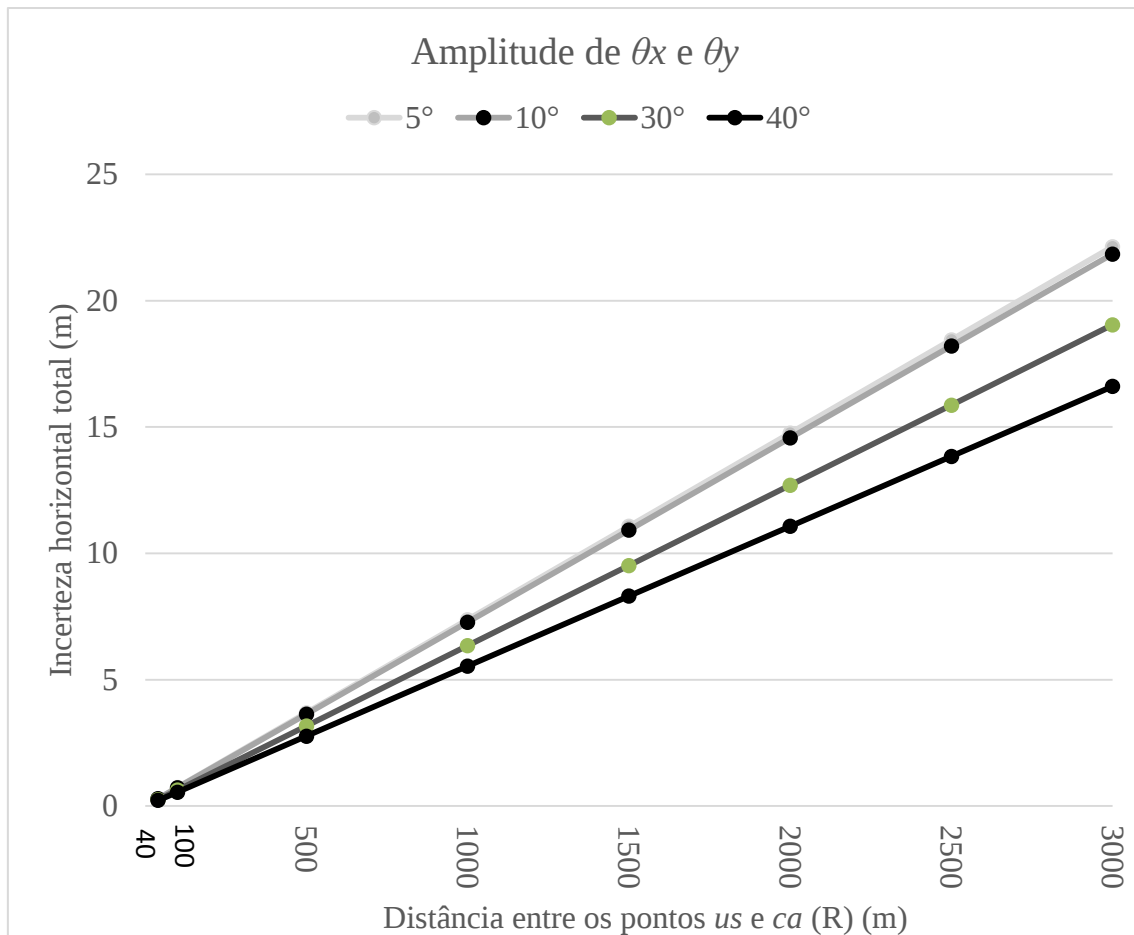


Figura 13 – Efeito do aumento dos ângulos acústicos e da distância espacial nas coordenadas geodésicas locais do ponto ca , em metros.

O gráfico da Figura 13 mostra que a amplitude dos ângulos acústicos influencia de formas diferentes na incerteza horizontal total, sendo que a maior amplitude dos ângulos acústicos melhora a qualidade posicional. Vale ressaltar que não foi levado em consideração a incerteza na velocidade de propagação do som nas camadas da coluna d'água, onde a reflexão e a refração crescem e degrada diretamente a qualidade posicional do AUV.

O gráfico da Figura 14 apresenta os efeitos das incertezas nos ângulos de atitude da embarcação e na distância espacial entre os pontos us e ca , medidos pelo USBL, nas coordenadas geodésicas locais do ponto ca , em metros. Consideraram-se os ângulos acústicos com valores de 1 grau e incerteza de 0,3 graus, as coordenadas do ponto us , no SGL, sem incertezas, ângulos de rotação (r_e, p_e, α_e) com valores de 1 grau e incerteza da distância espacial $(\sigma R) = R \cdot 0,00017$. Vale ressaltar que nas simulações no presente trabalho assumiu-se que o som se propaga em meio homogêneo com a mesma velocidade

em todas as camadas. Embora o gráfico mostre que a precisão do posicionamento acústico do AUV melhore com a maior amplitude nos ângulos acústicos, porém a interação do som entre as camadas d'água heterogêneas degrada consideravelmente a precisão.

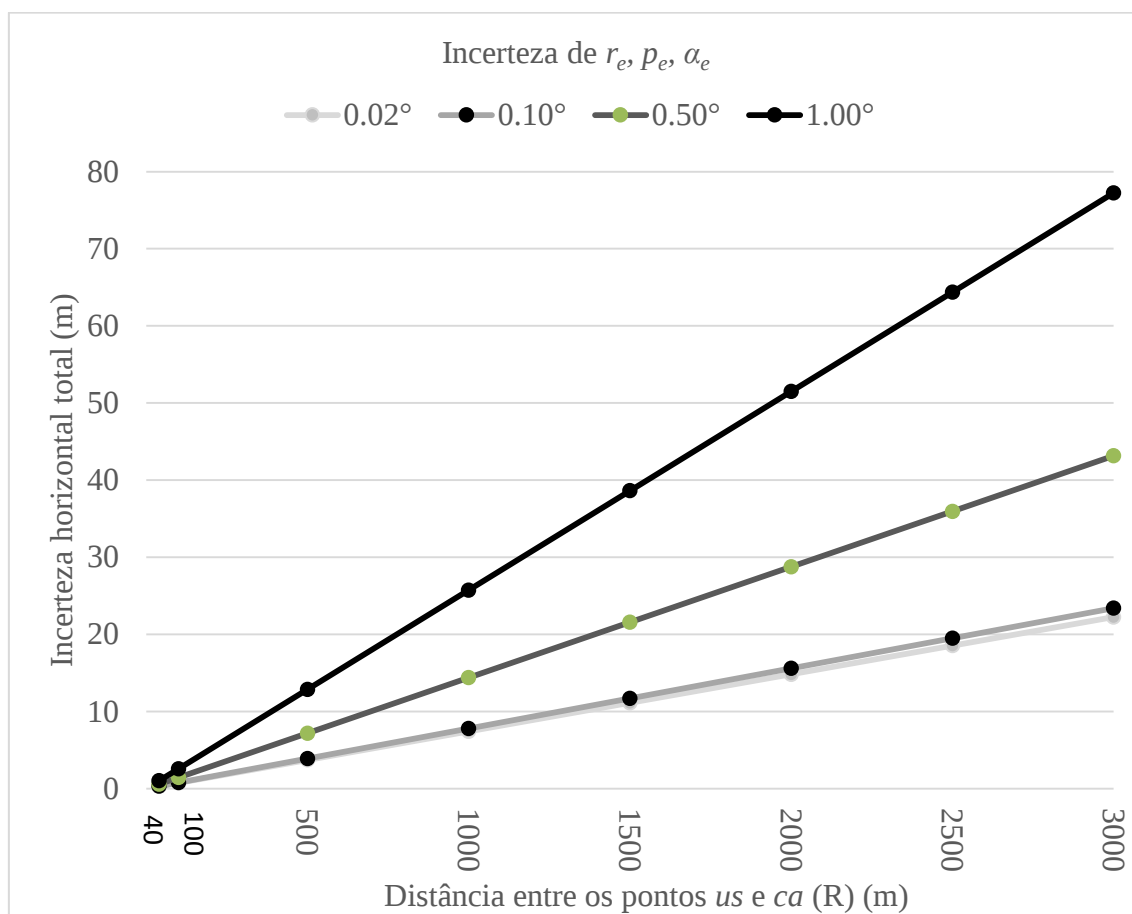


Figura 14 – Efeito das incertezas nos ângulos de rotação e na distância *R*, nas coordenadas do ponto *ca* no SGL, em metros.

A incerteza posicional do *ca* degrada significativamente com a qualidade da medição dos ângulos de rotação, conforme os resultados apresentados no gráfico da Figura 14. Em relação à distância tridimensional, quanto maior a profundidade de operação, maior a incerteza na posição horizontal do AUV. A precisão da medição dos ângulos acústicos e dos ângulos de rotação influenciam diretamente a qualidade posicional final do levantamento hidrográfico. Desta forma, a precisão do sistema de posicionamento acústico, da IMU e do Giro, devem ter qualidade compatível com as especificações requeridas do levantamento hidrográfico. Portanto, não basta ter um posicionamento acústico de qualidade se não tiver uma boa precisão na determinação dos ângulos de atitude com a IMU.

O gráfico da Figura 15 apresenta os efeitos das incertezas em r_a , p_a , α_a e nos *offsets*, $(X_a^{ca} - X_a^{cs}, Y_a^{ca} - Y_a^{cs}, Z_a^{ca} - Z_a^{cs})$, nas coordenadas do ponto *cs*, no SGL, em metros. Consideraram-se os ângulos de atitude (r_a, p_a, α_a) com valores de 1 grau e 1 cm de incerteza para cada *offset*.

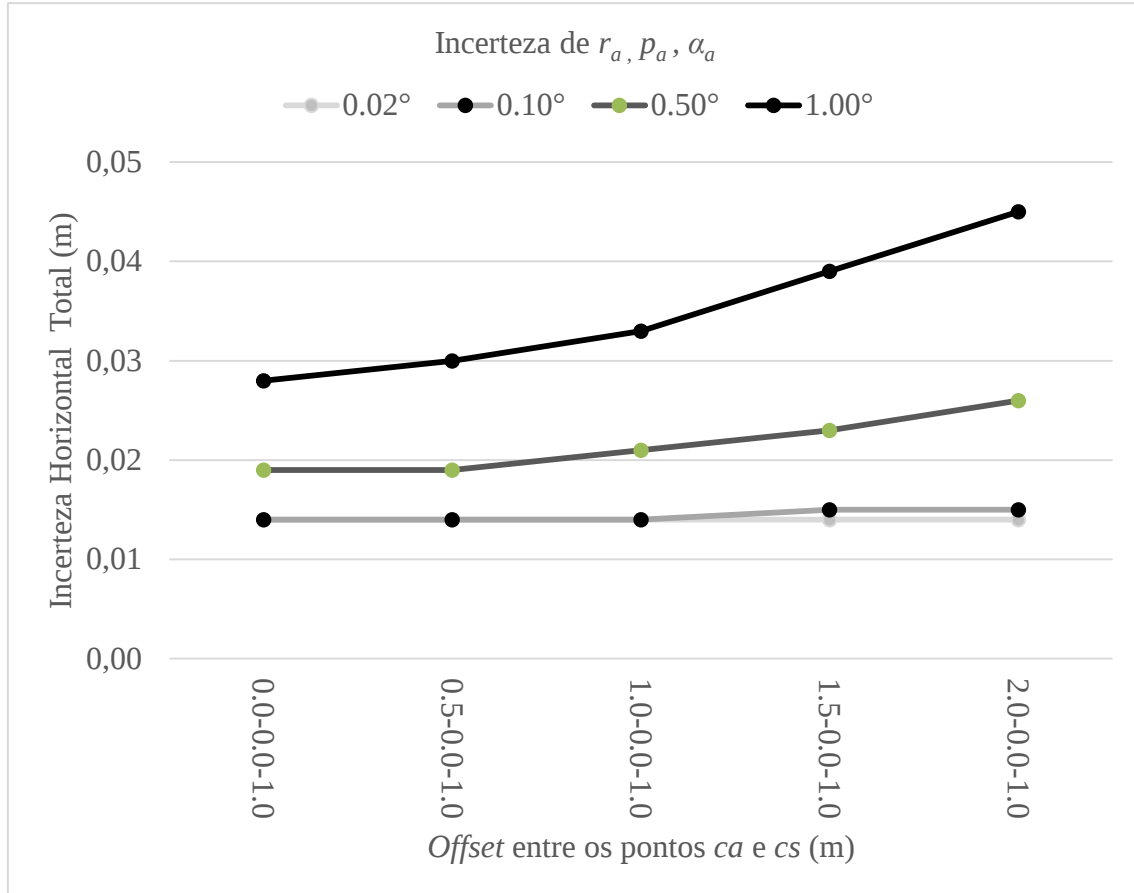


Figura 15 – Efeito das incertezas nos ângulos de atitude do AUV e nos *offsets*, nas coordenadas do ponto *cs*, no SGL, em metros.

Os resultados apresentados do gráfico na Figura 15 mostram que os *offsets* influenciam modestamente a qualidade posicional do sensor de LH, porém a precisão dos ângulos de atitudes degrada diretamente a qualidade posicional com valores na ordem de centímetro. Os baixos valores de incertezas são devidos as pequenas dimensões do AUV que possuem *offsets* ($Y_a^{ca} - Y_a^{cs}$) próximos de zero pelo formato cilíndrico do AUV, onde os sensores são instalados na parte superior ou inferior da plataforma. Vale ressaltar que essas qualidades posicionais são influenciadas diretamente pela incerteza na instalação destes sensores no AUV. Por serem muito pequenas, os *offsets* do AUV têm pouca influência na incerteza final do levantamento. No entanto, instalações adequadas dos

sensores e o conhecimento dos valores reais dos *offsets* tornam-se de suma importância na aquisição e processamento de dados hidrográficos.

O gráfico da Figura 16 apresenta os efeitos da distância (D) e do ângulo (θ) do levantamento hidrográfico nas coordenadas no SGL do ponto (f) em metros. Consideraram-se ângulos de atitude (r_a, p_a, α_a) com valores de 1 grau, incerteza da distância (σD) = $D \cdot 0,00017$ e 30 graus de abertura para o ângulo (θ) e incerteza de 0,2 grau.

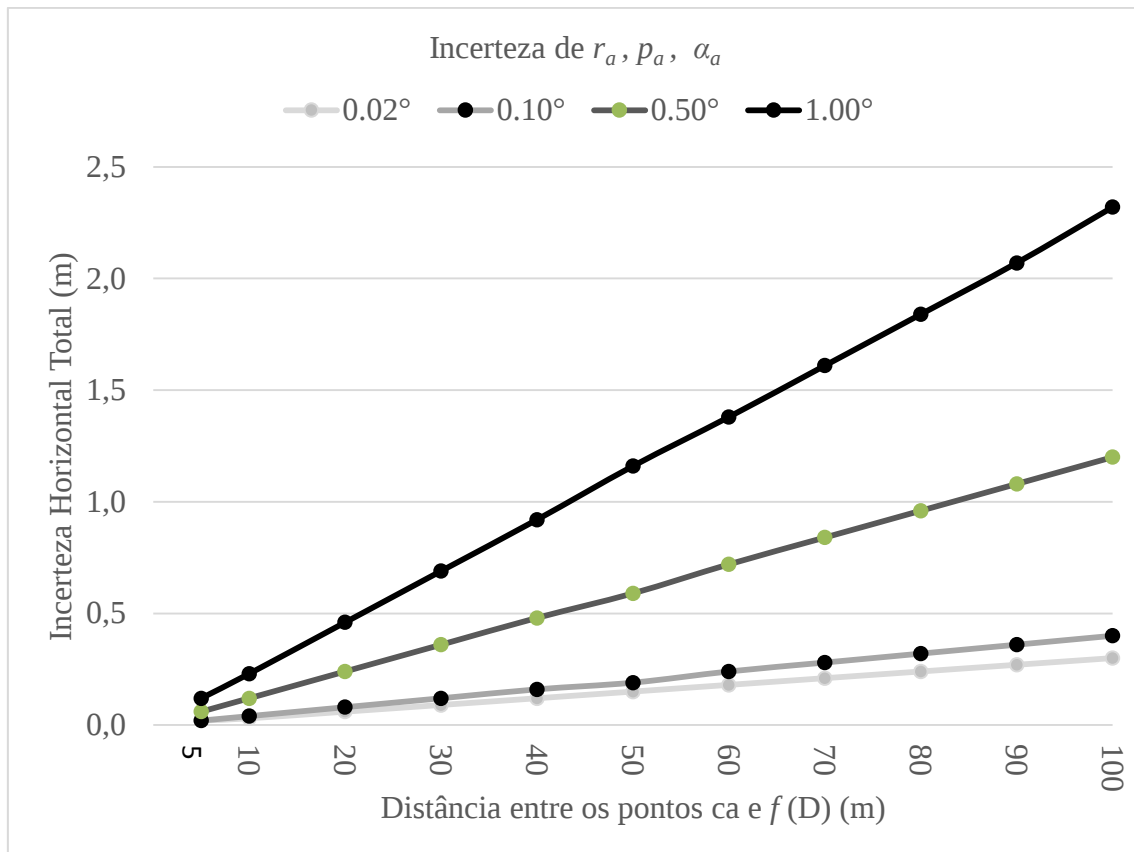


Figura 16 – Efeito das incertezas nos ângulos de atitude e na distância (D), nas coordenadas do ponto (f), no SGL, em metros.

As incertezas das informações espaciais de um LH são influenciadas pela precisão dos ângulos de atitude do AUV e da distância do sensor até o fundo marinho. Pode-se observar no gráfico da Figura 16 que a incerteza posicional varia na escala de centímetros para metro na posição horizontal.

O gráfico da Figura 17 apresenta os resultados provenientes da simulação das incertezas propagadas do ponto cf até ponto f , no SGL, em metros, dessa forma são apresentadas a incerteza total do levantamento hidrográfico com AUV. Considerou-se a

pior condição de posicionamento por GNSS com 1,00 m de incerteza inicial no posicionamento horizontal e vertical do cf . Os valores e incertezas dos sensores e dos *offsets* para a simulação da propagação das incertezas totais no levantamento hidrográfico com AUV são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de incertezas dos sensores e *offsets*.

Ponto	Descrição	Valor	Incerteza
cf	Incerteza inicial horizontal e vertical do centro de fase da antena GNSS.	-----	$\pm 1,00$ m
(r_e, p_e, α_e)	Ângulos de atitude da embarcação.	1,00°	$\pm 0,02^\circ$
$(X_e^{cf} - X_e^{us}, Y_e^{cf} - Y_e^{us}, Z_e^{cf} - Z_e^{us})$	<i>Offsets</i> entre os pontos cf e us .	10,00 m em cada eixo	$\pm 0,05$ m
θ_x e θ_y	Ângulos acústicos do USBL.	10,00°	$\pm 0,20^\circ$
R	Distância espacial entre os pontos us e ca .	-----	$R \cdot 0,00017$
$(r_a, p_a$ e $\alpha_a)$	Ângulos de atitude do AUV.	1,00°	$\pm 0,10^\circ$
$(X_a^{ca} - X_a^{cs}, Z_a^{ca} - Z_a^{cs})$	<i>Offsets</i> entre os pontos ca e cs nos eixos X e Z .	1,00 m	$\pm 0,01$ m
$(Y_a^{ca} - Y_a^{cs})$	<i>Offsets</i> entre os pontos ca e cs no eixo Y .	0,00 m	$\pm 0,01$ m
θ	Ângulo do levantamento hidrográfico.	30,00°	$\pm 0,20^\circ$
D	Distancia espacial entre os pontos ca e f .	-----	$D \cdot 0,00017$

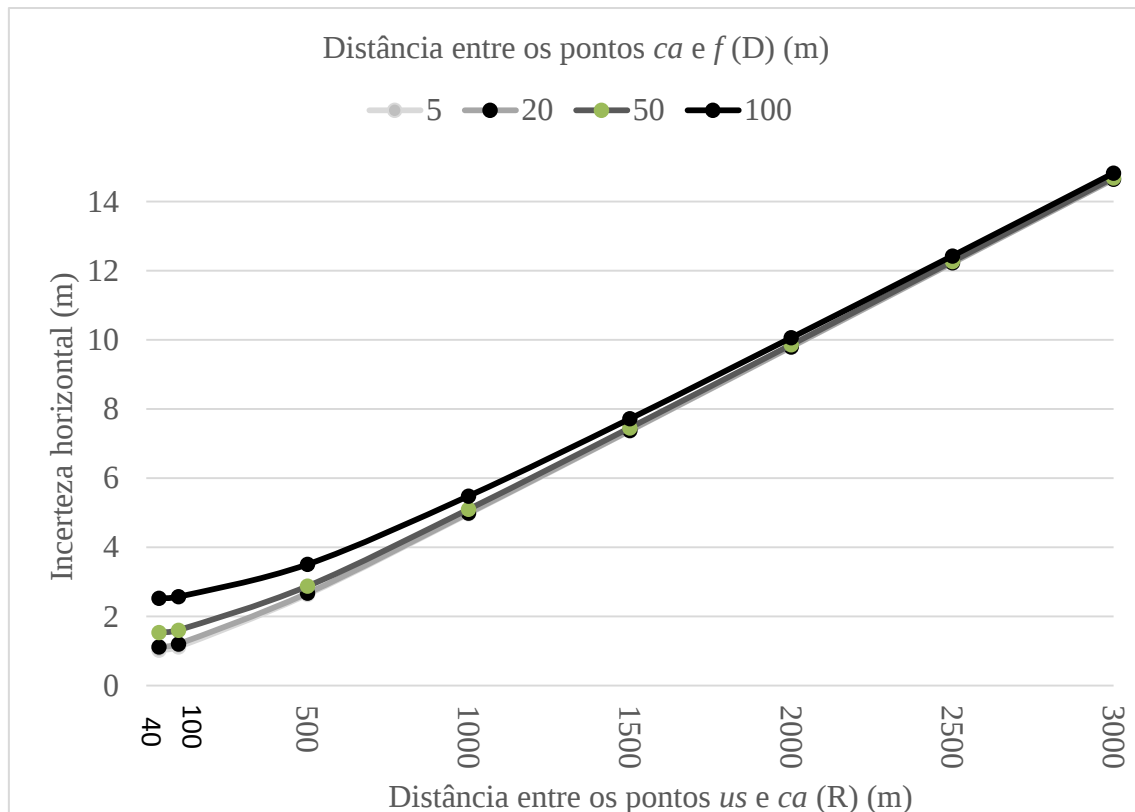


Figura 17 – Incertezas do receptor GNSS até o fundo marinho

O gráfico da Figura 17 mostra que, com a configuração supracitada, a incerteza posicional das informações espaciais do fundo marinho é fortemente influenciada pelas distâncias entre a embarcação e o AUV e deste até o fundo marinho. Mesmo assim, a incerteza horizontal total em todas as profundidades simuladas atende aos padrões da OHI. A incerteza vertical descreve a posição do AUV em relação ao posicionamento acústico pelo USBL, que por sua vez é relativo ao elipsoide. No entanto, esta informação não é usada para o cálculo da profundidade final da água.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A qualidade posicional das informações espaciais do fundo marinho depende diretamente da precisão dos sensores e das distâncias. Dessa forma é de vital importância a escolha de sensores com precisão nominal compatíveis, com a qualidade exigida, bem como sua correta instalação com o objetivo de minimizar as incertezas, com o modelo proposto, teve as seguintes conclusões:

Os *offsets* entre o centro de fase da antena GNSS e o transdutor USBL degradam a qualidade posicional diretamente, e o *offset* no eixo Z influencia consideravelmente na

qualidade posicional horizontal. Dessa forma, na montagem dos sensores, os *offsets* entre o centro de fase da antena GNSS e o transdutor USBL devem ser minimizados.

Na determinação das coordenadas do *transponder* do AUV, três fatores estudados influenciam diretamente na incerteza posicional (distância tridimensional, ângulos acústicos e ângulos de atitude). Em relação a distância tridimensional, quanto maior a profundidade de operação, maiores incertezas nas posições horizontais do AUV. A precisão da mensuração dos ângulos acústicos e dos ângulos de rotação influencia diretamente na qualidade posicional final do levantamento hidrográfico. Dessa forma, o sistema de posicionamento acústico, do IMU e da Girobússula deve ser compatível com demanda do levantamento hidrográfico

Por serem pequenos, os *offsets* internos no AUV tem pouca influência na precisão do resultado final. Porém, a devida instalação dos sensores e o conhecimento dos valores reais dos *offsets* torna-se importantes na fase de aquisição e processamento dos dados hidrográficos.

A distância entre o AUV e o fundo marinho influencia pouco na qualidade posicional do fundo marinho, porém, a qualidade da medição dos ângulos de atitude influencia fortemente a qualidade posicional. Deve-se levar em consideração a resolução espacial e a incerteza posicional necessária para determinar a altura do AUV em relação ao fundo marinho e a precisão do IMU e Giro.

Fase crítica em um levantamento hidrográfico com AUV é o posicionamento acústico pelo USBL. Porém, o levantamento hidrográfico com AUV, considerando a correta configuração de sensores e equipamentos, atende as especificações da incerteza horizontal total de todas as ordens da IHO (2010) em relação de precisão exigida no levantamento.

Recomenda-se realizar uma avaliação experimental para medir a incerteza do modelo com simulações da variação da velocidade do som devido aos diferentes meios de propagação da onda acústica, bem como avaliar a incerteza vertical total e modelagem dos sistemas acústicos LBL e SBL.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, E. S.; YAKOUB, N.; HOSNY, M.. "Evaluating the performance of using PPK-GPS technique in producing topographic contour map." **Marine Geodesy** **40(4)**: 224-238, 2017.
- BREIVIK, M. & FOSSEN, T. I. Guidance Laws for Autonomous Underwater Vehicles (4ed.). In: **Inzartsev, A. V. (Ed.), Underwater Vehicles**, p. 51-76, 2009.
- CHEN, C.; MILLERO, F. J. Speed of sound in seawater at high pressures. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 62, n. 5, p. 1129-1135, 1977.
- DE JONG, K., GOODE, M., LIU, X., & STONE, M. New Developments in Precise Offshore GNSS Positioning. In: **Quantitative Monitoring of the Underwater Environment**. Springer International Publishing, 2016. (pp. 3-12).
- DE PALMA, D., ARRICHIELLO, F., PARLANGELI, G., e INDIVERI, G. Underwater localization using single beacon measurements: Observability analysis for a double integrator system. **Ocean Engineering**, v. 142, p. 650-665, 2017.
- EL-DIASTY, M. Development of real-time PPP-based GPS/INS integration system using IGS real-time service for hydrographic surveys. **Journal of Surveying Engineering**, v. 142, n. 2, p. 05015005, 2015.
- ELSOBEIEY, M.; EL-RABBANY, A. 2013. Efficient between-satellite single-difference precise point positioning model. **Journal of Surveying Engineering**, v. 140, n. 2, p. 04014007, 2013.
- FELSKI, A.; NAUS, K.; WAŻ, M. **The problem of the instrument stabilization during hydrographic measurements**. Reports on Geodesy and Geoinformatics, v. 100, n. 1, p. 55-65, 2016.
- GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Editora UFPR, 1994.
- GUEROT, D.; CHEDRU, J.; DANIEL, S.; MAILLARD, E. The patch test: a comprehensive calibration tool for multibeam echosounders. **OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition**. V. 3: 1655-1661. 2000.
- HARE, R. Depth and Position Error Budgets for Multibeam Echosounding. **The International Hydrographic Review (LXXII)**, p. 37, 1995.
- IHO. **C-13 Manual de Hidrografia**. IHO, 2005, traduzido pelo Instituto Hidrográfico, 2010.
- IMCA. Deep Water Acoustic Positioning. **IMCA M 200 Rev. 1, IMCA S 013 Rev. 1**, 2014.

JEKELI, C. **Geometric Reference Systems in Geodesy. Division of Geodetic Science**, School of Earth Sciences Ohio State University, USA, p. 15, 2012.

HEGRENÆS, Ø., SÆB, T. O., & HAGEN, P. E. Horizontal mapping accuracy in hydrographic AUV surveys. In: **Autonomous Underwater Vehicles, 2010 IEEE/OES**. IEEE, p. 1-13, 2010.

KONGSBERG MARITIME AS. **APOS for HiPAP: Systems Acoustic Positioning Operator Station - Instruction Manual**. Noruega, 2013

LEICK, A. **GPS satellite surveying**. John Wiley & Sons, 3ed, 2004.

MELO, J. MATOS, A. Survey on advances on terrain based navigation for autonomous underwater vehicles. **Ocean Engineering**, v. 139, p. 250-264, 2017.

PAULL, L. S.; SETO, M.; LI, H. AUV navigation and localization: A review. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 39, n. 1, p. 131-149, 2014.

PHILIPS, D. R. C. An Evaluation of USBL and SBL Acoustic Systems and the Optimisation of Methods of Calibration-Part 1. **Hydrographic Journal**, p. 18-25, 2003.

RODRIGUES, D. D. **Rede geodésica de precisão no Estado de Minas Gerais: avaliação de diferentes estratégias de processamento e ajustamento**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. doi:10.11606/T.3.2002.tde-06122002-115813.

WILSON, W. D. Speed of sound in sea water as a function of temperature, pressure, and salinity. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 32, n. 6, p. 641-644, 1960.

WYNN, R. B.; HUVENNE, V. A.; LE BAS, T. P.; MURTON, B. J.; CONNELLY, D. P.; BETT, B. J.; RUHL, H. A.; MORRIS, K. J.; PEAKALL, J.; PARSONS, D. R.; SUMNER, E. J.; DARBY, S. E.; DORRELL, R. M.; HUNT, J. E.; SUMNER, E. J. Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience. **Marine Geology**, v. 352, p. 451-468, 2014.

ZOU, Y.; WANG, C.; ZHU, J.; Li, Q. 2017. Optimal sensor configuration for positioning seafloor geodetic node. **Ocean Engineering** 142: 1-9.

CAPÍTULO 2 – REDUÇÃO DE RUÍDOS *SPECKLE* NO MAPEAMENTO DE ESTRUTURAS LINEARES SUBMARINAS EM IMAGENS DE SONAR DE ABERTURA SINTÉTICA

RESUMO

A utilização do Sonar de Abertura Sintética (SAS) no levantamento hidrográfico com veículo autônomo subaquático (AUV) tem possibilitado o mapeamento de pequenos objetos a grandes profundidades. As imagens de sonar oriundas desses levantamentos são de grande resolução espacial devido à tecnologia de abertura sintética e à aproximação com o AUV no alvo de interesse. Apesar dessas vantagens as imagens do SAS são altamente prejudicadas por um ruído multiplicativo granular, chamado ruído *speckle*, que dificulta a implementação de métodos de identificação dos objetos de modo automatizado. O objetivo desse trabalho foi avaliar a redução do ruído *speckle* e melhora no contraste de feições de estruturas lineares submarinas em imagens SAS, tanto por aspectos qualitativos quanto por análises quantitativas, com a utilização de Processamento Digital de Imagem (PDI) usando técnicas de realce de imagem. Foram utilizadas duas imagens adquiridas pelo sonar HISAS 1030, com resolução espacial de 4x4 cm e resolução radiométrica de 8bits. A partir dos resultados, pôde-se verificar que os ruídos *speckle* tiveram redução significativa de 14,4% e 6,9%, e ganho discreto de 0,2% e 1,2% para cada imagem, respectivamente, no realce das feições lineares referentes as áreas de estudo. Os resultados mostraram que o uso de funções de realce de imagens é uma poderosa ferramenta na redução dos ruídos *speckle* e melhora na definição dos objetos de interesse em imagens SAS, permitindo assim, processamentos semiautomatizados mais rápidos e eficazes de extração de feições.

Palavras-chave: Sonar de Abertura Sintética, ruído *speckle*, AUV.

SPECKLE NOISE REDUCTION IN THE MAPPING OF SUBMARINE LINEAR STRUCTURES IN SYNTHETIC APERTURE SONAR IMAGES

ABSTRACT

The use of the Synthetic Aperture Sonar (SAS) in the hydrographic survey with autonomous underwater vehicle (AUV) has enabled the mapping of small objects at great depths. The sonar images from these surveys are of high resolution due to synthetic aperture technology and the AUV approach to the target of interest. Despite these advantages SAS image are highly corrupted by a granular multiplicative noise, called speckle noise, which hamper automated object identification methods. The same was the result of a reduction in noise and improvement in linear differences of submarines in SAS images, both qualitatively and quantitatively, using Digital Image Processing (PDI), using image enhancement techniques. Two images acquired by sonar HISAS 1030 were used, with spatial resolution of 4x4 cm and radiometric resolution of 8 bits.

From the results, it was verified that the speckle noise had a significant reduction of 14.4% and 6.9%, and a discrete gain of 0.2% and 1.2% for each image, respectively, in the enhancement of features the study areas. The results showed that the use of image enhancement functions is a powerful tool in reducing speckle noise and improving the definition of objects of interest in SAS images, thus allowing faster and more efficient semiautomatic processing of feature extraction.

Keywords: Sonar Aperture Synthetic, speckle noise, AUV.

1 INTRODUÇÃO

O Sonar de Abertura Sintética, também conhecido como *Synthetic Aperture Sonar* (SAS), consiste em uma tecnologia de imageamento subaquático que utiliza conceitos do radar de abertura sintética e de sonar de visada lateral. Tal tecnologia é empregada no levantamento tridimensional através de imagens acústicas e batimetria do fundo marinho. Sendo uma técnica que possibilita obter alto grau de resolução espacial, cerca de 10 vezes maior comparada com sonar de varredura lateral (HAYES e GOUGH, 2009; GIARDINA, 2012; PAN et al., 2016). Segundo Melo e Matos (2017), o SAS gera imagens de alta resolução para mapeamentos de pequenos objetos localizados no fundo do mar.

Apesar dessas vantagens, segundo Hurtós et al. (2017), a imagem do SAS possui características ruidosas que dificultam implementar os métodos de identificação de objetos de forma automatizada. Chanussot et al. (2002) e Chailla et al. (2007) relatam que as imagens SAS são altamente corrompidas por um ruído multiplicativo granular, chamado ruído *speckle*. Este ruído consiste numa alteração de características do sinal transmitido por efeito de outro sinal exterior ao sistema de transmissão, ou gerado pelo próprio sistemas de transmissão. Isso reduz as resoluções espaciais e radiométricas. Esse ruído pode ser muito perturbador para a interpretação e análise automática de imagens SAS.

O objetivo desse trabalho foi avaliar quantitativamente e qualitativamente a redução do ruído *speckle*, bem como o aumento de contraste de feições de estruturas lineares submarinas associadas ao transporte de óleo e gás em imagens de SAS com uso de técnicas de realce de imagem.

2 IMAGEM DO SAS

As imagens do SAS cedidas para essa pesquisa foram provenientes do levantamento hidrográfico, contratado pela PETROBRÁS S.A., a bordo do veículo autônomo subaquático (*Autonomous Underwater Vehicle* – AUV), na Bacia de Campos. Utilizaram-se duas imagens adquiridas pelo sonar HISAS 1030 da Kongsberg com as seguintes características: frequência de 50kHz a 120kHz, resolução espacial de 4x4 cm e resolução radiométrica de 8bits. A primeira imagem utilizada no presente estudo possui dimensões aproximadas de 300 metros de largura e 340 metros de comprimento, que correspondem respectivamente à 7634 colunas *por* 8484 linhas (Figura 1), e será

denominada aqui por IM1. Cerca de 99,67% (103.281 m²) da área representada pela imagem IM1 corresponde a fundo marinho, e o restante da imagem (0,33% ou 346 m²) representa cabos e dutos.

Já a segunda imagem, denominada de IM2, possui dimensões aproximadas de 340 metros de largura e 300 metros de altura que corresponde à 8484 colunas por 7634 linhas. Cerca de 99,69% da imagem IM2 (ou 103,292 m²) corresponde a fundo marinho, e cabos e dutos representam cerca de 0,31% (ou 322 m²) de toda a imagem (Figura 2).

As duas imagens são trechos distintos do levantamento hidrográfico, os diâmetros dos alvos (cabos e dutos) são indicados pelas setas (em amarelo) nas respectivas figuras.

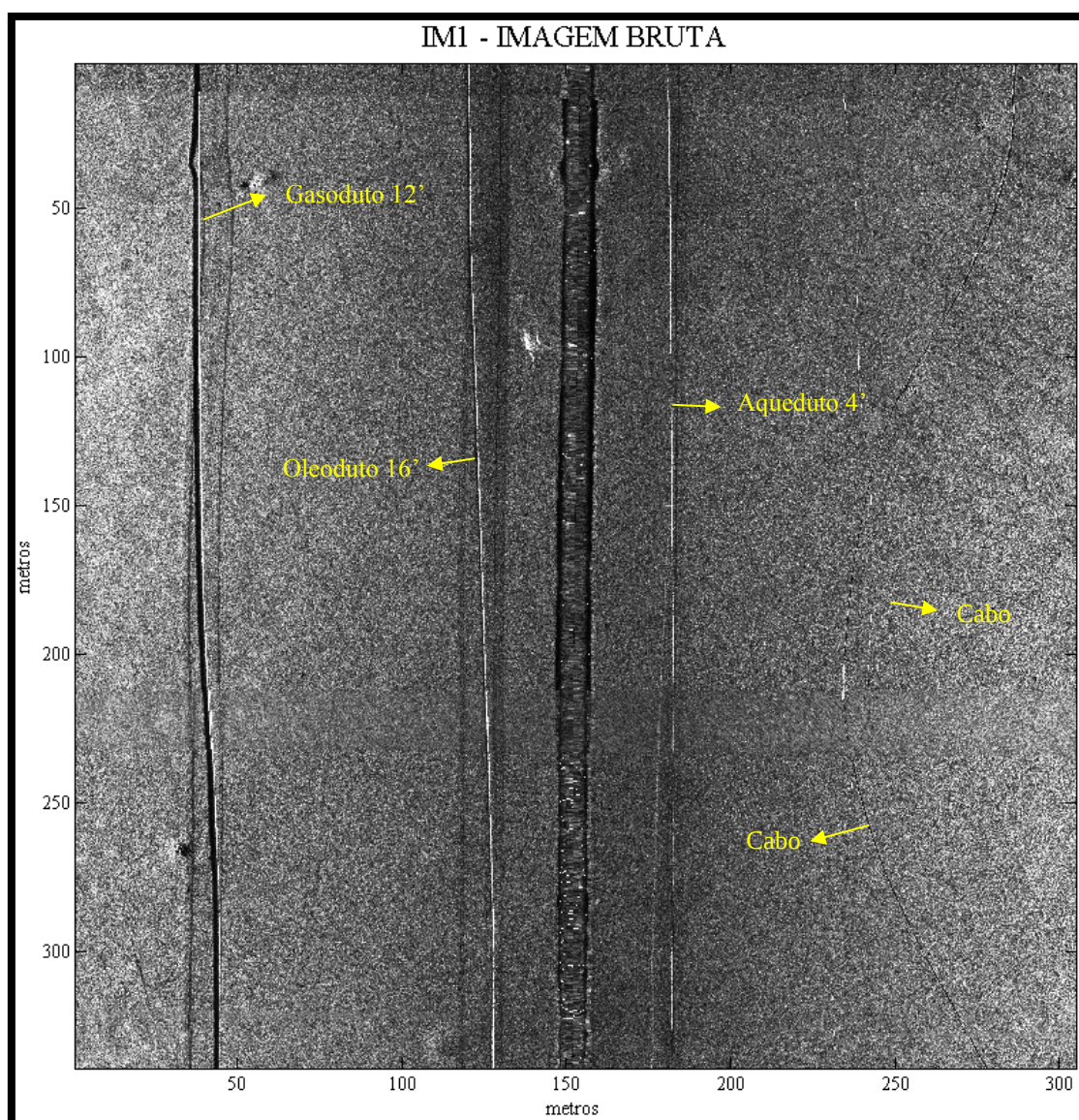


Figura 1 – IM 1: trecho de uma imagem SAS obtida do levantamento hidrográfico a bordo do AUV.

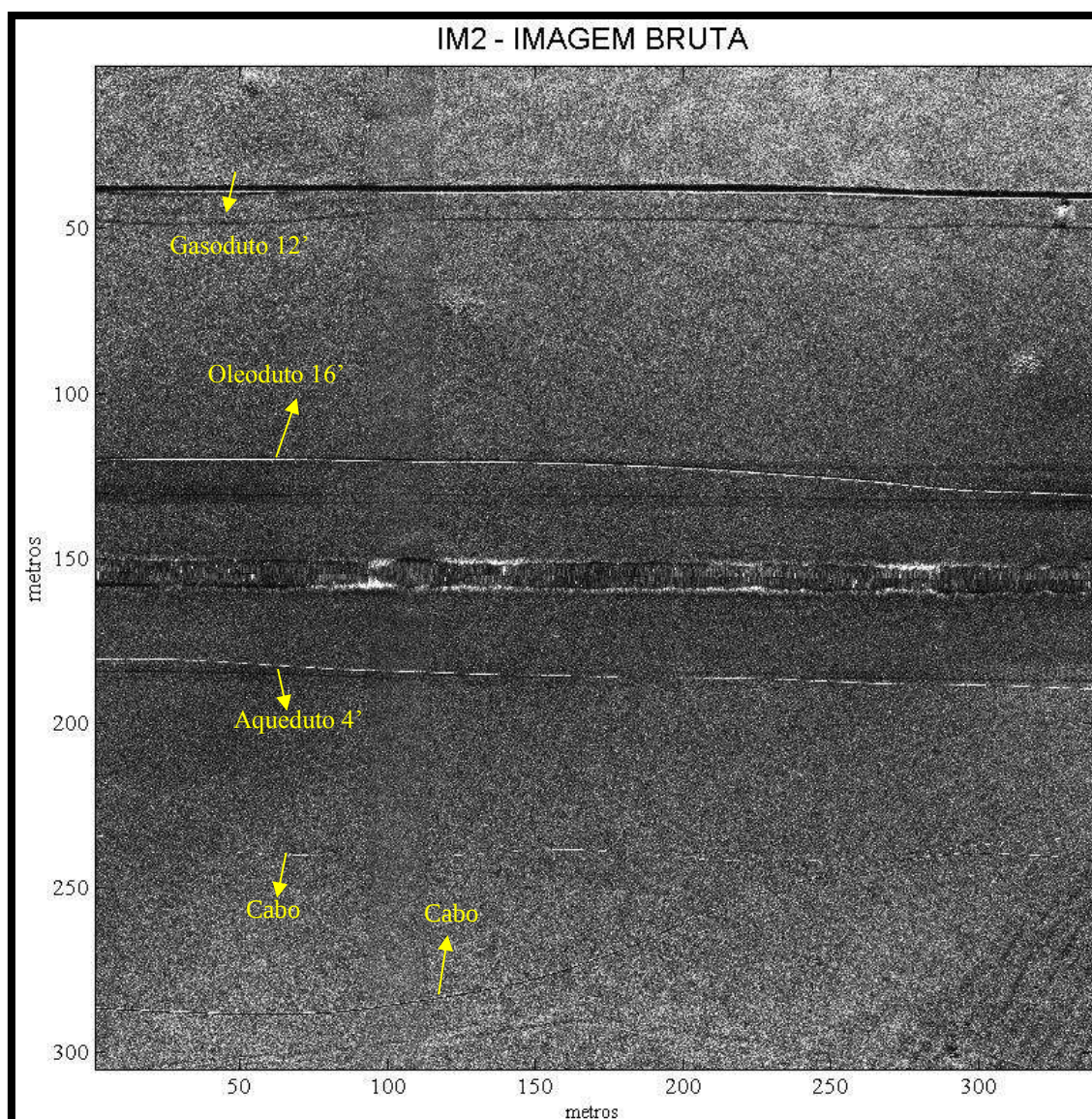


Figura 2 – IM2: outro trecho de uma imagem SAS obtida do levantamento hidrográfico a bordo do AUV.

3 REDUÇÃO DO RUÍDO *SPECKLE* E REALCE DE FEIÇÕES LINEARES

A metodologia aplicada nesse estudo resume-se na aplicação de quatro técnicas de processamento digital de imagem (Filtros adaptativos, *Stretching*, Filtros morfológicos e binarização), com diferentes combinações e configurações, para a redução de ruído e realce de feições de estruturas lineares no transporte de óleo e gás. O processo de avaliação dos resultados consistiu na análise de quatro classes temáticas a partir de duas classes (“Fundo marinho” e “Estruturas submarinas”) pelo método de comparação *pixel* a *pixel*, tabulação cruzada, entre a imagem de referência e as imagens resultante dos processamentos aplicados.

3.1 Filtros adaptativos

Os filtros adaptativos Lee, Kuan, Gamma e Frost têm sido desenvolvidos para a redução do ruído *speckle* em imagem de Sonar de Abertura Sintética com o objetivo de aumentar a relação sinal-ruído e melhorar o contraste entre os alvos de interesse e do fundo marinho, com a mínima perda de informação, Frery e Sant'anna (1993), Sant'anna e Mascarenhas (1996), Tso e Mather (2009) e Buemi et al. (2014).

- O filtro Lee (LEE, 1980) adota o modelo multiplicativo para os ruídos, por meio de aproximação de um modelo linear. Segundo Leportier e Park (2016), o método baseia-se na análise das propriedades estatísticas locais, com aplicação do critério de minimização do erro quadrático médio, da imagem ruidosa. Foi projetado para minimizar o ruído *speckle*, preservando as bordas.
- O filtro Kuan (Kuan et al., 1987) é bastante similar ao filtro Lee, mas com uma função de ponderação diferente, assim, o modelo de ruído multiplicativo é transformado em um modelo de ruído aditivo dependente do sinal, e em seguida, o critério da minimização do erro quadrático médio é aplicado a este modelo.
- O filtro Gamma MAP (máximo a posteriori) para a redução do ruído *speckle* foi proposto pela primeira vez por Kuan et al. (1987). A reflectividade da cena foi assumida com uma distribuição Gaussiana distribuída. No entanto, isso não é totalmente realista, uma vez que implica implicitamente uma reflectividade negativa. Lopes et al., (1990) modificou o filtro Kuan MAP assumindo uma cena por distribuição gama.
- O filtro de Frost, segundo Frost et al. (1982) e Chaillan et al. (2007), é um filtro adaptativo para reduzir o ruído *speckle* enquanto preserva bordas nas imagens, derivado da minimização do erro médio quadrático sobre o modelo multiplicativo. É um filtro convolucional, linear, e incorpora uma dependência estatística entre os valores da resposta do sinal através de uma função de correlação exponencial.
- O filtro de Mediana (HEYGSTER, 1982) tem a propriedade de reduzir ruídos e conservar as regiões de bordas. Tem a função de atribuir a cada

ponto visitado o valor mediano para uma determinada janela utilizada (com a ordenação dos valores).

3.2 Contraste pelo histograma (*Stretching*)

Este algoritmo de realce de contraste é mais simples, onde, os valores de cinza na imagem original e a imagem modificada seguem uma relação com várias funções que podem ser utilizadas, nesse presente estudo será utilizada a função linear. Segundo Kang (1977) essa técnica de contraste consiste na redistribuição entre os extremos das intensidades de nível de cinza da imagem, dessa forma, os valores de *pixels* dos objetos ou detalhes que eram escuros na imagem original se tornarão claros na imagem contrastada.

3.3 Filtros morfológicos

A Morfologia Matemática (MM) pode ser definida como uma teoria para a análise de estruturas espaciais a partir da característica do filtro e do elemento estruturante. Chama-se morfologia porque visa analisar a forma dos objetos, e é matemático no sentido de que a análise é baseada em teoria de conjuntos, geometria integral e álgebra de rede.

O elemento estruturante “é um conjunto, completamente definido e conhecido pela forma e tamanho, que é comparado, a partir de uma transformação, aos conjuntos desconhecidos da imagem. O formato e o tamanho do elemento estruturante possibilitam testar e quantificar de que maneira o elemento estruturante “está ou não está contido” na imagem. O resultado dessa transformação permite avaliar estes conjuntos”, (FACON, 1996).

A MM não é apenas uma teoria, mas também uma poderosa técnica de análise de imagem e quando usada adequadamente, as operações morfológicas podem simplificar as imagens preservando suas formas essenciais e eliminando o ruído (SERRA, 1982; SOILLE, 2003).

Segundo Medeiros et al. (2002), o processo de realce de bordas pode ser estabelecido a partir de uma combinação entre uma imagem original e a imagem correspondente aberta (operação de abertura), ou usar a imagem fechada (operação de fechamento) e a imagem original, dessas combinações são elaborados os filtros morfológicos *Tophats*.

3.4 Binarização

A binarização consiste em converter imagens em tons de cinza para imagens binárias. Essa técnica de PDI consiste na bipartição do histograma, transformando os pixels cujos tons de cinza são maiores ou iguais a um certo valor de limiar T (ou dentro de um intervalo de valores) em tonalidades claras (255) e os demais em tonalidades escuras (0) (ABREU et al., 2013).

3.5 Avaliação quantitativa e qualitativa

O processo de avaliação dos resultados consistiu na análise de quatro classes temáticas, Tabela 1, a partir de duas classes (“Fundo marinho” e “Estruturas submarinas”) pelo método de comparação *pixel a pixel*, tabulação cruzada, entre a imagem de referência e as imagens resultante dos processamentos aplicados. A tabulação cruzada permite determinar a proporção de detecção dos alvos de interesse, e consequentemente sua influência na redução de ruídos.

Tabela 1 – Classes temáticas das imagens.

Imagem de referencia	Imagem avaliada	Resultado da avaliação
0=Fundo marinho (Negativo)	0=Fundo marinho (Negativo)	0=Fundo marinho (Verdadeiro negativo)
1=Estruturas submarinas (Positivo)	1 = Estruturas submarinas (Positivo)	1 =Fundo marinho (Falso positivo)
		2 = Estruturas submarinas (Falso negativo)
		3 = Estruturas submarinas (Verdadeiro positivo)

As imagens de referência foram obtidas a partir de uma vetorização manual das imagens brutas de SAS (Figuras 1 e 2), e posterior classificação visual nas classes “Fundo Marinho” e “Estrutura submarina”. A imagem a ser avaliada corresponde à imagem binária com feições extraídas pela combinação das técnicas de PDI.

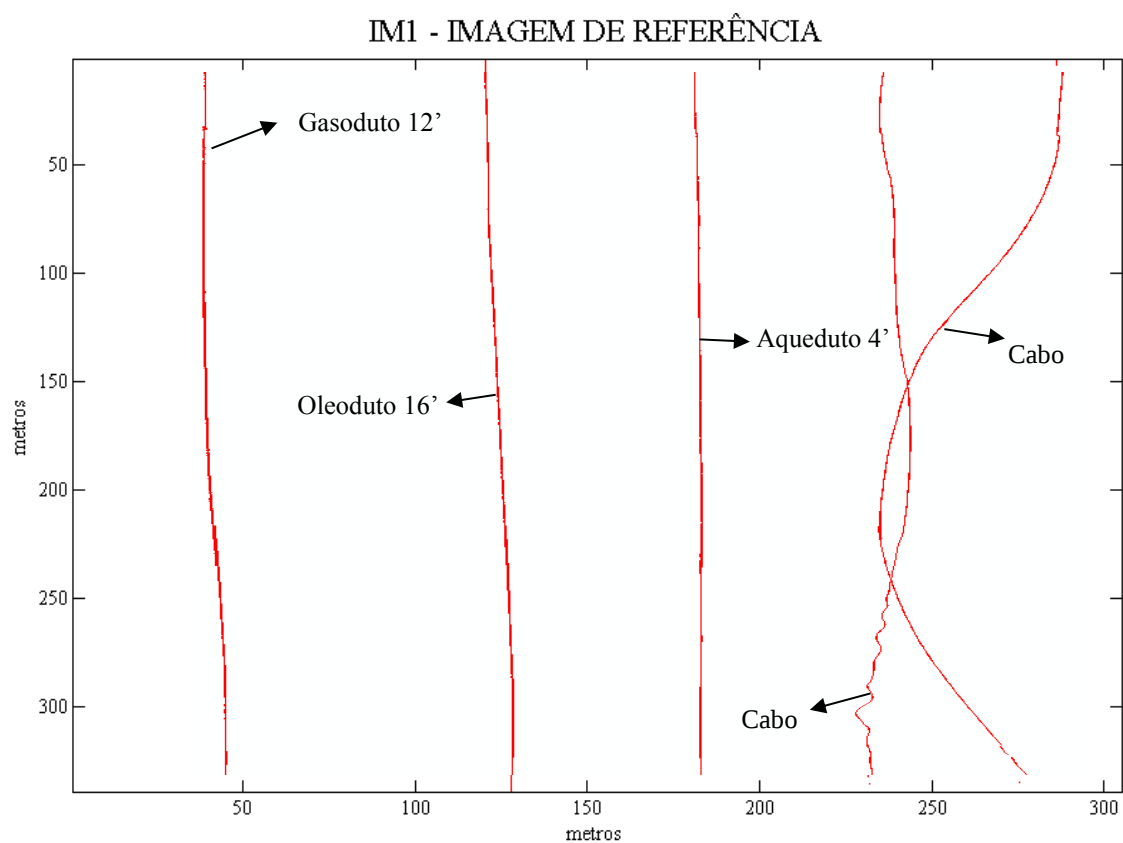


Figura 3 – Imagem de referência 1, referente a IM1.

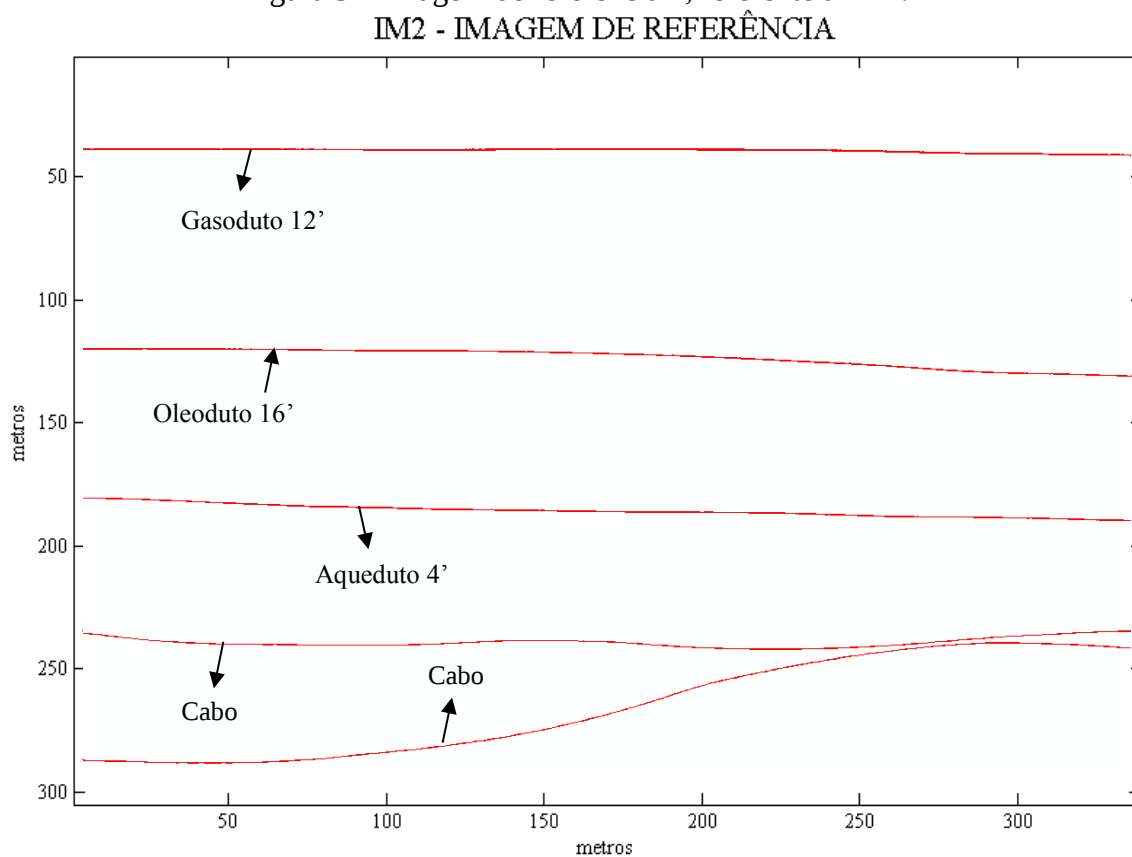


Figura 4 – Imagem de referência 2, referente a IM2.

A avaliação dos resultados foi realizada pela soma entre duas vezes a imagem de referência e a imagem avaliada, conforme Figura 5, resultando nas quatro classes da avaliação presentes na Tabela 1. A imagem de referência foi multiplicada por 2 para evitar resultados iguais na avaliação.

	Imagem de referência				Imagem avaliada				Avaliação		
2x	1	0	1	+	0	1	1	=	2	1	3
	0	1	0		0	1	0		0	3	0
	0	0	1		1	0	1		1	0	3

Figura 5 – Demonstração do processo de Avaliação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram gerados e analisados vários resultados oriundos do processamento das técnicas de PDI acima descritas. Dentre os vários experimentos realizados, serão apresentados apenas os resultados mais significativos. Inicialmente serão exibidos os resultados de cada técnica de PDI, a comparação entre a ordem sequencial de processamento, a performance representativa de cada técnica de PDI no processamento final, e por último as imagens com os resultados do processamento para análise visual.

4.1 Análise quantitativa referente as técnicas de PDI

Nessa seção serão apresentados os resultados da aplicação de cada técnica de PDI para avaliação da performance na redução do ruído *speckle* e no realce de feições lineares em imagens de SAS. A análise é realizada com base nos resultados de binarização no nível de 60% das imagens bruta (IM1 e IM2) que são denominados “Bina IM1” e “Bina IM2”.

4.1.1 Binarização

A conversão da imagem de níveis de cinza para uma imagem binária foi importante para tentar separar as estruturas submarinas do fundo marinho. O gráfico da Figura 6 apresenta o resultado da binarização da IM1 em função da quantidade de ruído e da definição do objeto de interesse ocorrido no processo de binarização. Pode-se observar que o ruído diminui e a definição do objeto aumenta com o aumento do limiar

da binarização, dessa forma a melhor condição da relação objeto/ruído para os experimentos realizados ocorre na interseção entre as duas curvas na IM1 (Ruído e Perda do objeto) com 64% de binarização (Perda do objeto e Ruído com 11,6%), e na IM2, Figura 7, ocorre com 58% de binarização (Perda do objeto e Ruído com 11,6%).

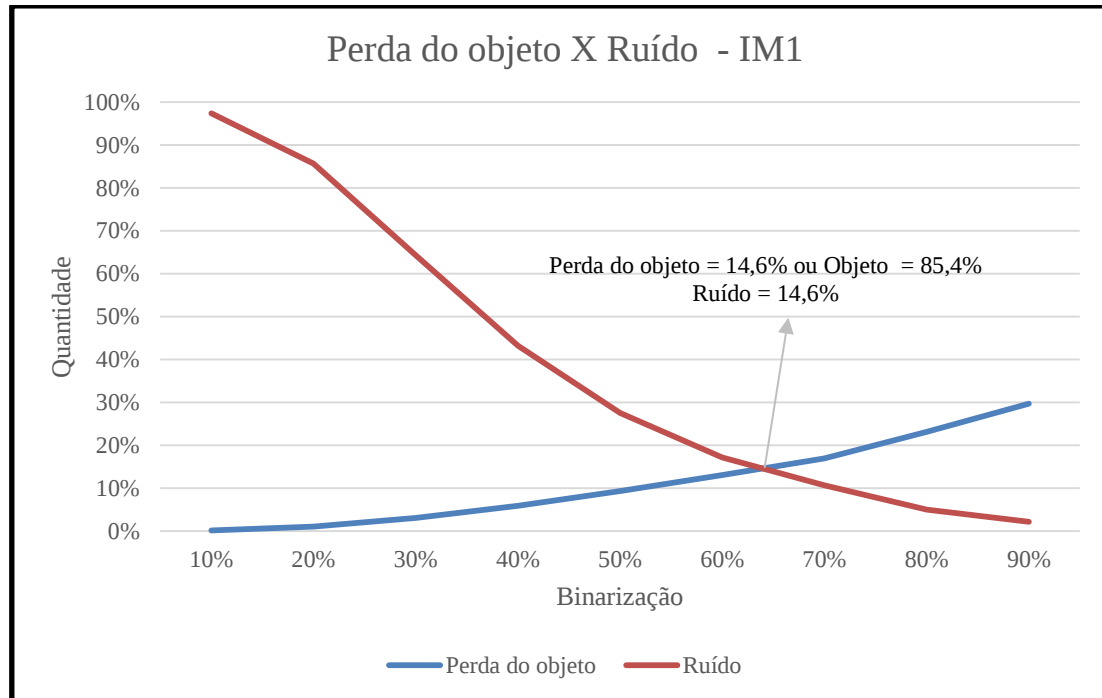


Figura 6 – Perda do objeto x ruído no processo de binarização da imagem IM1.

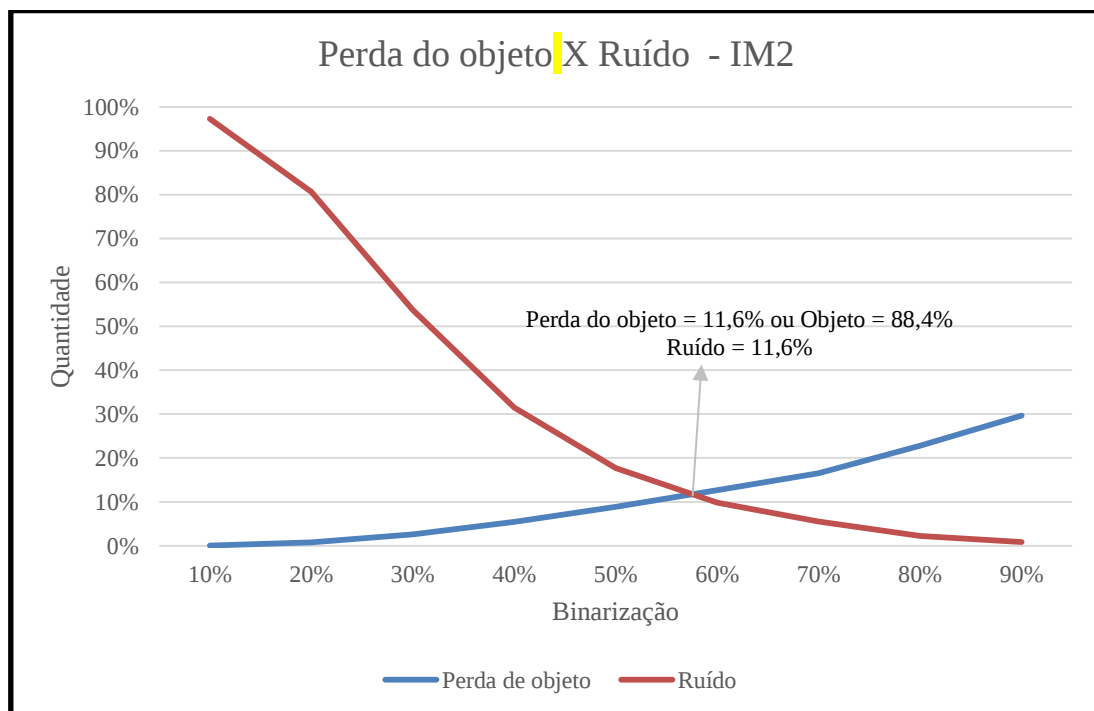


Figura 7 – Perda do objeto x ruído no processo de binarização da imagem IM2.

Como pode-se perceber nas Figura 6 e 7, a relação na definição do objeto versus o ruído, nas imagens testadas, apontaram intersecções para um melhor desempenho da técnica empregada, em função da minimização do ruído e maximização da preservação na definição dos objetos de interesse da cena. Os resultados dos dois processamentos, em termos quantitativos de definição do objeto foram de 86,9% e 87,4% e de minimização dos ruídos em 17,2% e 9,9%, respectivamente, para as duas imagens.

4.1.2 Filtros adaptativos

Os filtros adaptativos também objetivam reduzir os ruídos e realçar as bordas para a melhor identificação do alvo de interesse. Os gráficos das Figuras 8 e 9 mostram os resultados de cinco experimentos dos filtros adaptativos para a redução do ruído *speckle* e realce das estruturas submarinas para cada imagem (IM1 e IM2). Observa-se que todos os filtros adaptativos tiveram boa performance com a redução do ruído e melhora na definição do objeto, comparados com o resultado da “Bina IM1” e “Bina IM2”. Os filtros Frost e Gamma tiveram melhores resultados em relação aos demais filtros adaptativos com redução de aproximadamente 5,0% de ruídos e aumento de mais de 1,0% do sinal (objeto de interesse) em relação aos resultados da binarização, dessa forma representando os filtros adaptativos com melhor relação objeto/ruído.

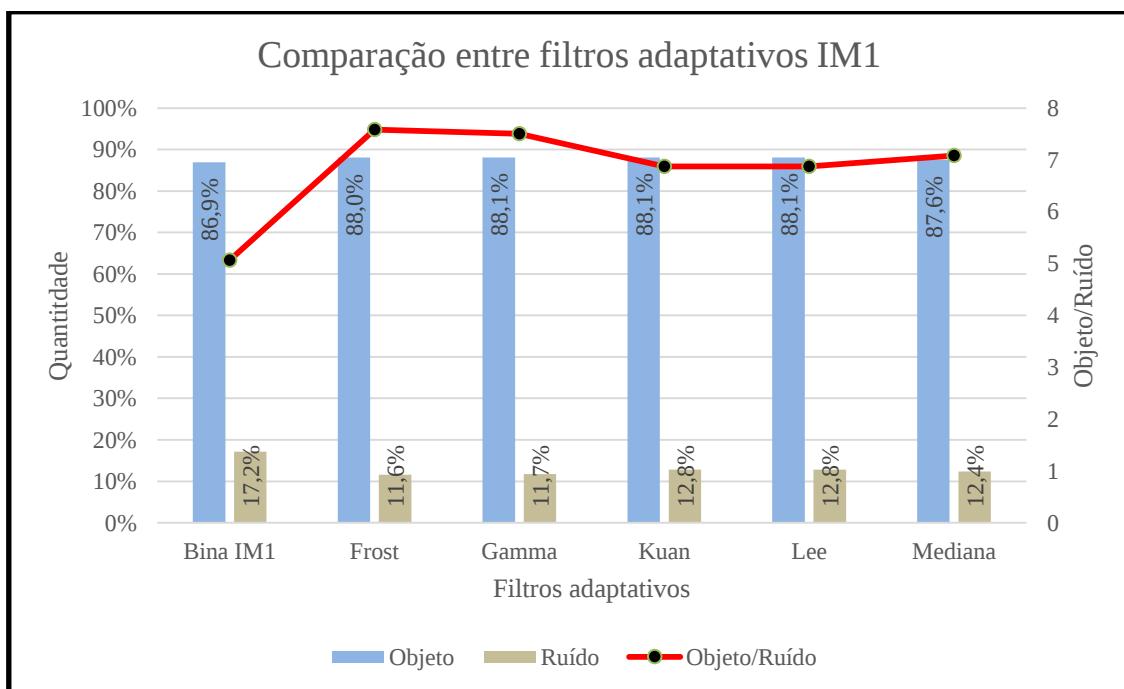


Figura 8 – Resultados dos filtros adaptativos para as imagens IM1 e IM2.

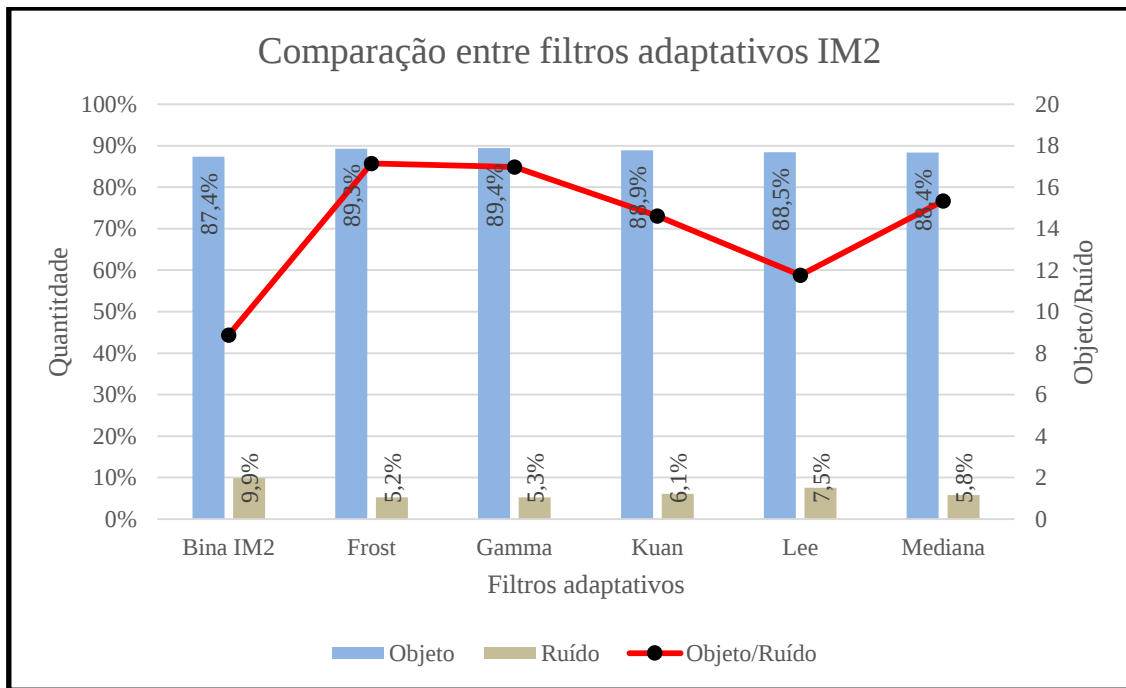


Figura 9 – Resultados dos filtros adaptativos para as imagens IM1 e IM2.

4.1.3 Filtro de contraste pelo histograma (*Stretching*)

O *Stretching* consiste na manipulação dos níveis de cinza com o objetivo de aumentar o contraste entre o fundo marinho e as estruturas submarinas. Os gráficos das Figuras 10 e 11 apresentam os resultados do *Stretching* com a função linear em cinco diferentes níveis de porcentagem nos resultados da “Bina IM1” e “Bina IM2”.

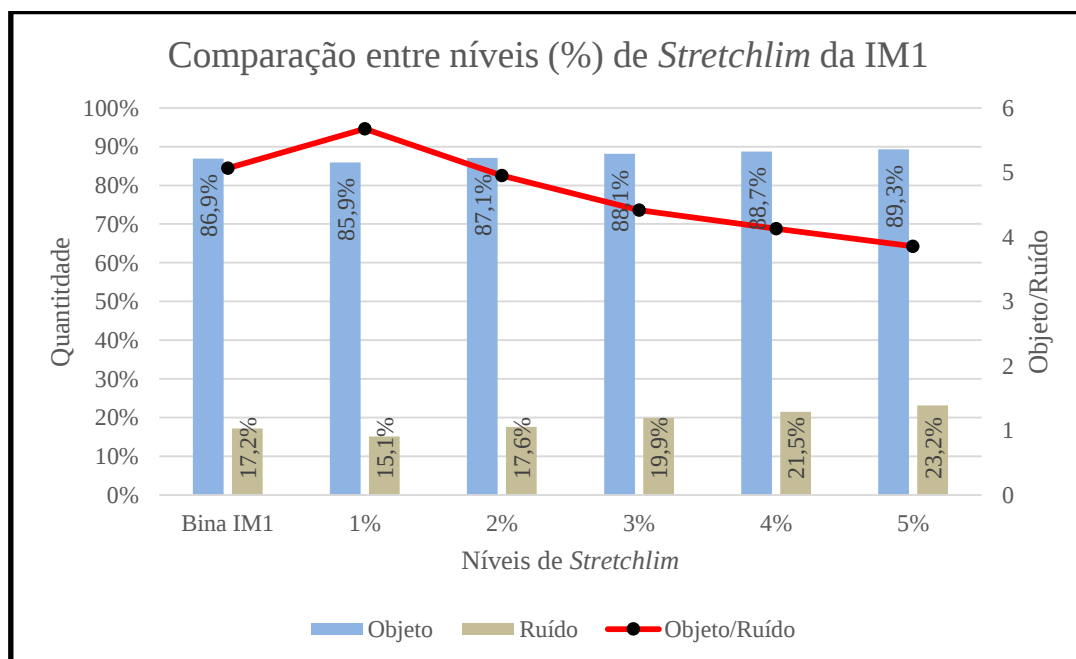


Figura 10 – Análise dos diferentes níveis (%) de *Stretching* na IM1.

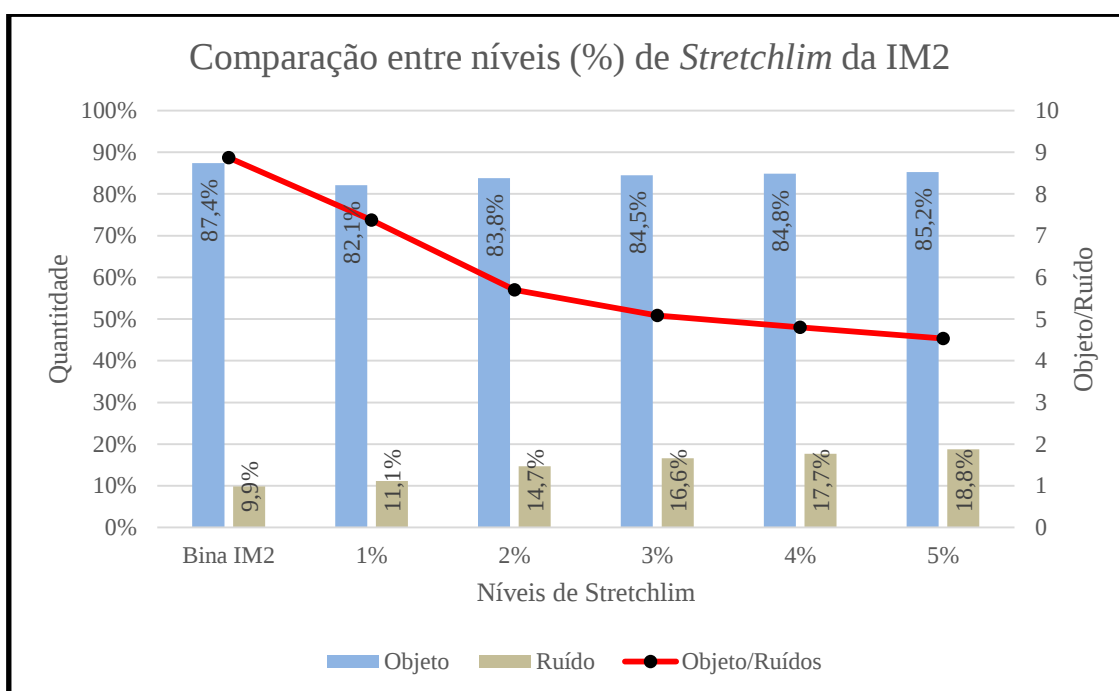


Figura 11 – Análise dos diferentes níveis (%) de *Stretching* na IM2.

A partir dos resultados (Figuras 10 e 11) pode-se observar que o nível de porcentagem do *Stretching* varia diretamente com a diminuição na definição do objeto e o aumento do ruído. A relação objeto/ruído com nível 1% de *Stretching* melhorou em relação a Bina IM1, Figura 10. Isso se deve ao fato de que a imagem IM 1 tem menor relação objeto/ruído comparada com a IM2. Dessa forma o *Stretching* com nível de 1% apresenta melhores resultados nas imagens de SAS do estudo, uma vez que na IM1 teve a melhor relação objeto/ruído e na IM2 teve uma menor caracterização do objeto e menor aumento do ruído.

4.1.4 Morfologia Matemática

Os filtros morfológicos visam realçar as propriedades geométricas dos sinais com o intuito de realçar as estruturas submarinas e eliminar os ruídos. Os gráficos das Figuras 12 e 13 apresentam os resultados do filtro morfológico *Tophat* com os elementos estruturantes *octagon*, *disk* e *diamond*.

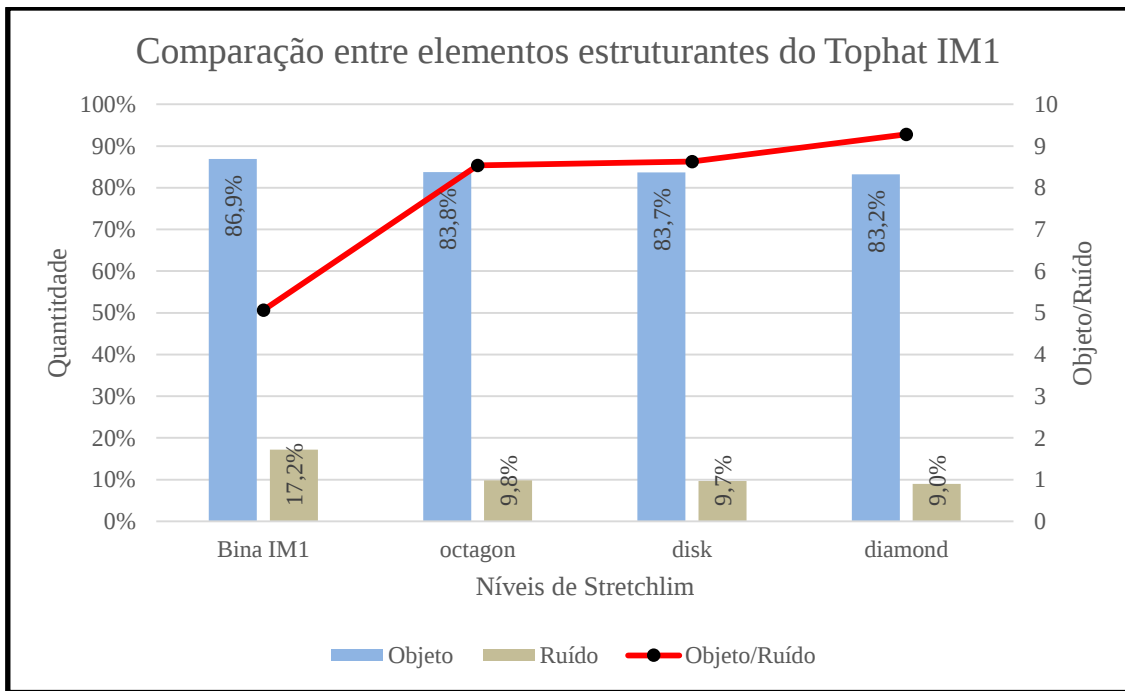


Figura 12 – Análise dos elementos estruturante do filtro morfológicos *Tophat IM1*.

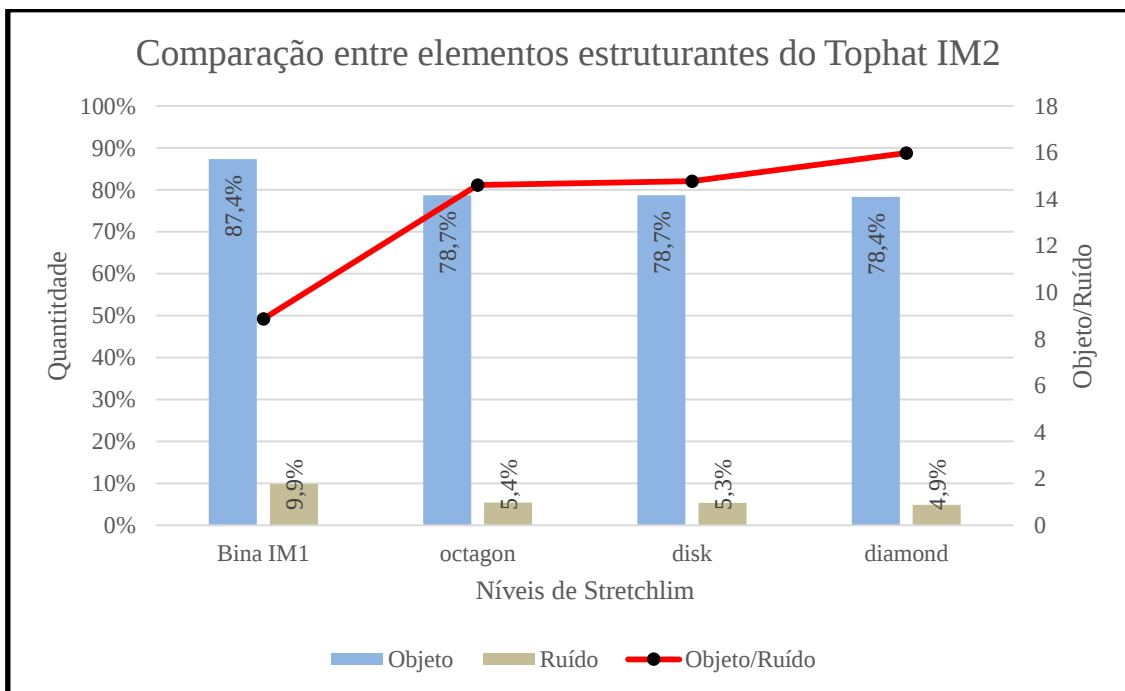


Figura 13 – Análise dos elementos estruturante do filtro morfológicos *Tophat IM2*.

Pode ser observado nos resultados (Figuras 12 e 13) que os diferentes elementos estruturantes apresentaram performance semelhantes com a redução da caracterização do objeto e do ruído comparados com os resultados da “Bina IM1” e da “IM2”. A melhor relação objeto/ruído nos resultados apresentados nos gráficos das Figuras 12 e 13 foi com

o uso do elemento estruturante *Diamond*, porém foi também a que teve a maior redução na quantidade de sinal (objeto).

4.2 Análise quantitativa das combinações das técnicas de PDI

Os resultados apresentados anteriormente mostraram o potencial de cada técnica de PDI isolada, aplicada para o realce das feições lineares e redução do ruído *speckle* em imagens de SAS. Visto os resultados foram bastante positivos individualmente, realizou-se também experimentos com a combinação de tais técnicas, em diferentes sequências a fim de verificar o desempenho conjunto dessas ferramentas. A análise do desempenho dessas combinações foi testada com seis diferentes experimentos, conforme mostra a Tabela 2, para determinar qual a ordem de aplicação para melhor eficácia no realce das feições lineares e redução de ruído *speckle* em imagens de SAS.

Os gráficos das Figuras 14 e 15 apresentam os resultados provenientes das diferentes combinações de processamento em relação às imagens IM1 e IM2.

Tabela 2 – Combinações das técnicas de PDI.

Bina	Técnicas de PDI			
C1	<i>Stretching</i> (1%)	Tophat (<i>diamond</i>)	Filtro Frost	Binarização (60%)
C2	<i>Stretching</i> (1%)	Filtro Frost	Tophat (<i>diamond</i>)	Binarização (60%)
C3	Filtro Frost	<i>Stretching</i> (1%)	Tophat (<i>diamond</i>)	Binarização (60%)
C4	Tophat (<i>diamond</i>)	<i>Stretching</i> (1%)	Filtro Frost	Binarização (60%)
C5	Tophat (<i>diamond</i>)	Filtro Frost	<i>Stretching</i> (1%)	Binarização (60%)
C6	Filtro Frost	Tophat (<i>diamond</i>)	<i>Stretching</i> (1%)	Binarização (60%)

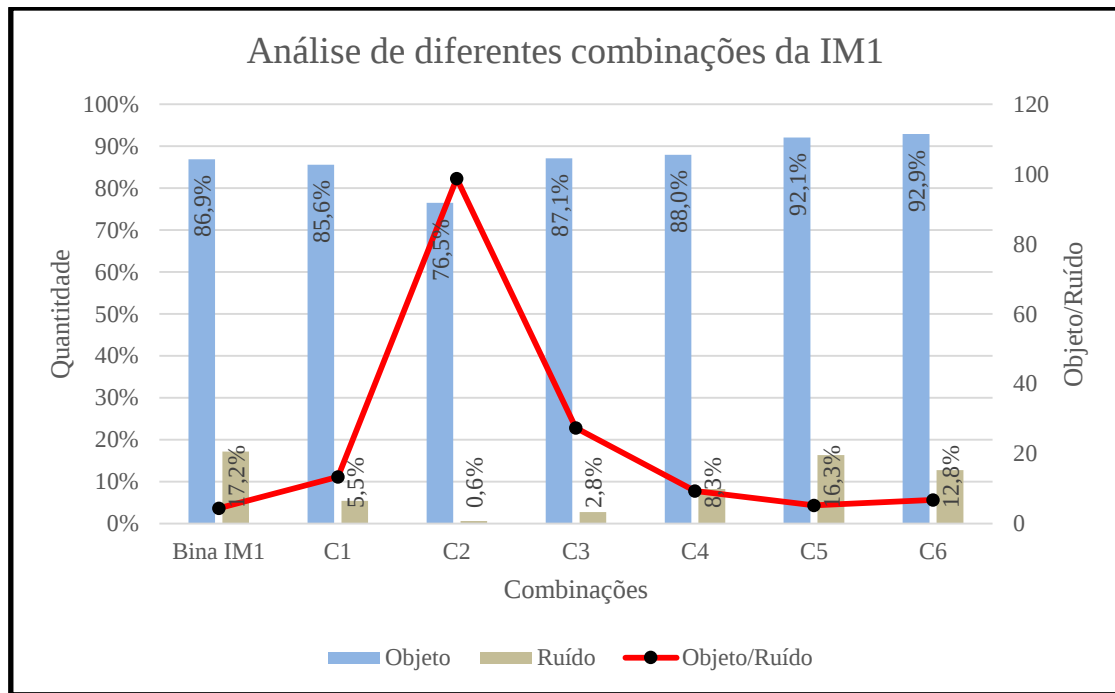


Figura 14 – Análise de diferentes combinações na imagem IM1.

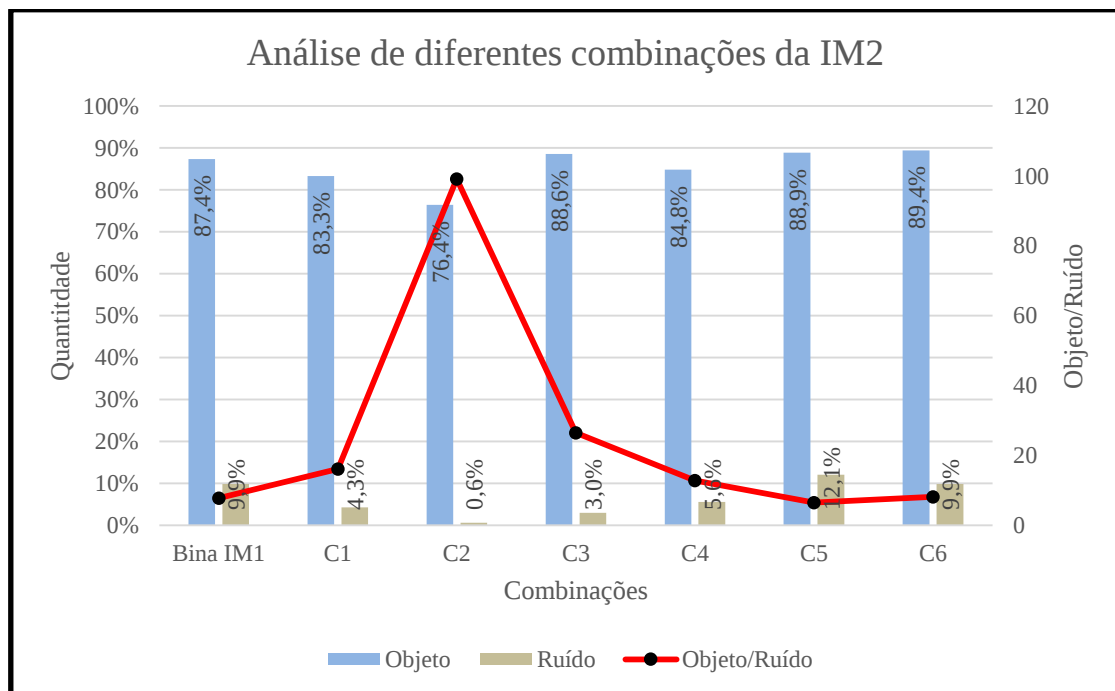


Figura 15 – Análise de diferentes combinações na imagem IM2.

Pode ser observado (Figuras 14 e 15) que o experimento C2 obteve a melhor relação objeto/ruído em comparação com as demais, porém essa combinação diminuiu consideravelmente em 10,4% a quantidade de sinal (objeto). Assim, a combinação C3 teve os melhores resultados em relação objeto/ruído por ter reduzido o ruído ao nível de

aproximadamente 3% e aumentado em mais de 1% o sinal (objeto) nas imagens IM1 e IM2.

4.3 Análise da representatividade das técnicas de PDI

Com intuito de verificar a representatividade de cada técnica de PDI no processamento final realizado, considerando a combinação C3 a qual apresentou melhores resultados, foram testados três diferentes processos onde uma das técnicas de PDI não foi utilizada (Figuras 16 e 17). Assim, não foram utilizados na P1 o filtro morfológico, na P2 o filtro adaptativo e na P3 o *Stretching*, conforme mostra a Tabela 3, e comparados com os resultados da combinação C3.

Tabela 3 – Configuração dos processamentos das técnicas de PDI.

Processo	Imagem bruta	Filtro adaptativo	<i>Stretching</i>	Tophat	Binarização
C3	IM1 e IM2	Filtro Frost	1%	<i>diamond</i>	60%
P1	IM1 e IM2	Filtro Frost	1%	-----	60%
P2	IM1 e IM2	-----	1%	<i>diamond</i>	60%
P3	IM1 e IM2	Filtro Frost	-----	<i>diamond</i>	60%

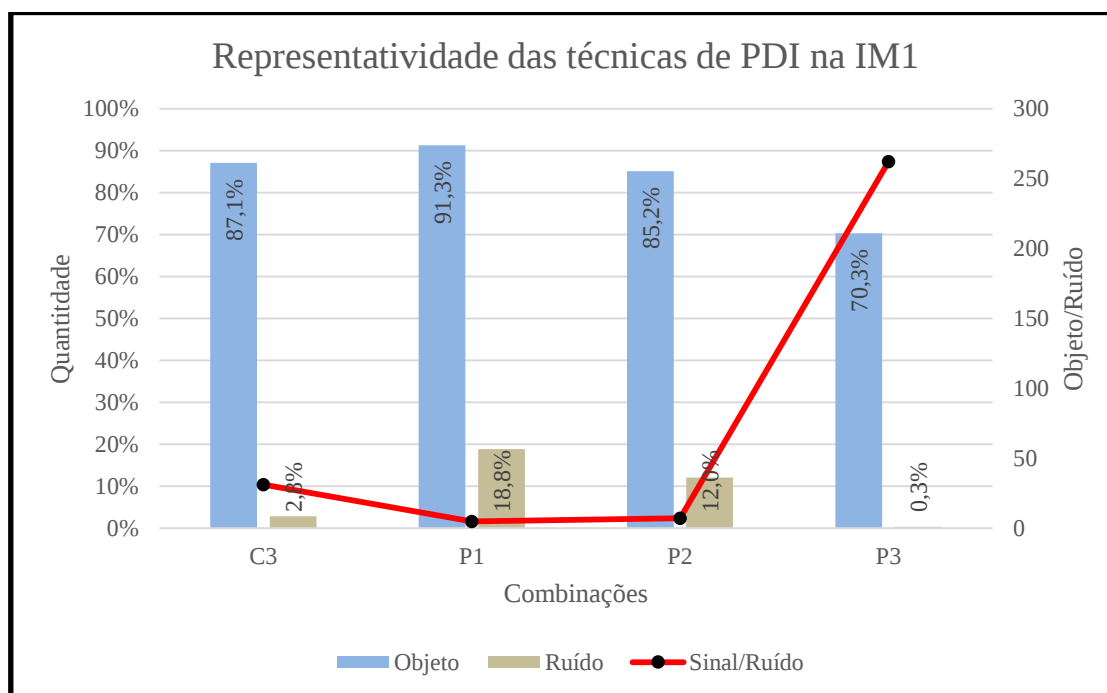


Figura 16 – Representatividade das técnicas de PDI na IM1.

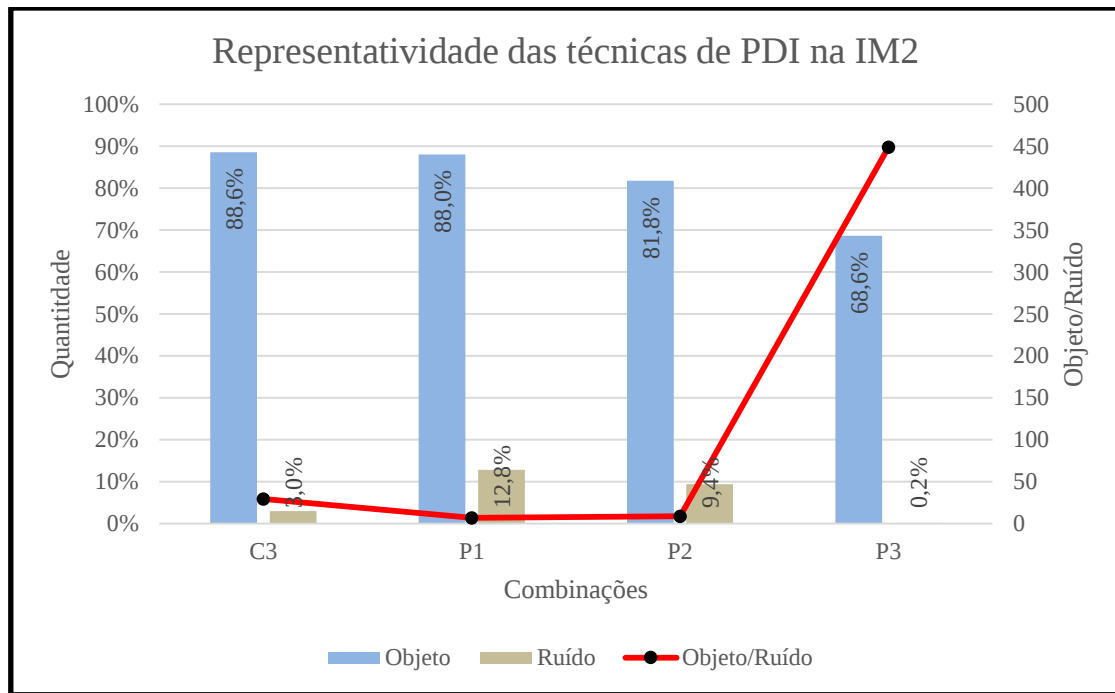


Figura 17 – Representatividade das técnicas de PDI na IM2.

Os gráficos das Figuras 16 e 17 apresentam os resultados da representatividade das técnicas de PDI com o processamento da combinação C3. O processamento P3 teve a melhor relação objeto/ruído, porém esse processamento diminuiu a quantidade de sinal (objeto) em 16,8% comparado com a C3. Dessa forma, as técnicas de PDI analisadas em conjunto, utilizadas no processamento C3 são importantes para a melhor performance dos filtros, no intuito de realçar as feições lineares associadas ao transporte de óleo e gás e reduzir os ruídos das imagens de SAS.

4.4 Avaliação visual

As Figuras 18 e 19 apresentam as imagens brutas e as imagens resultantes do processamento C3 referentes as imagens IM1 e IM2. Pode ser observado que os resultados ainda possuem elevado nível de ruídos e apesar de se ter alcançado um bom desempenho na definição dos objetos de interesse, algumas estruturas submarinas foram suprimidas. As estruturas que tiveram maiores perdas foram os cabos e o aqueduto, que por possuem menores diâmetros sofreram mais com processo de remoção dos ruídos. Dessa forma, a Figura 20 apresenta em detalhe quatro recortes referentes às imagens brutas (IM1 e IM2), as imagens com nível de 60% de binarização (Bina IM1 e Bina IM2) e o processamento com a combinação C3 das imagens IM1 e IM2. Também pode ser

visualizado que os ruídos foram suprimidos consideravelmente, e os dutos tiveram sua forma praticamente toda preservada, recortes 1 e 3, enquanto os cabos tiveram parte de suas formas suprimidas, recortes 2 e 4, isso é justificado pela baixa reflexão do alvo devido ao pequeno diâmetro que o cabo possui em comparação aos outros alvos da cena.

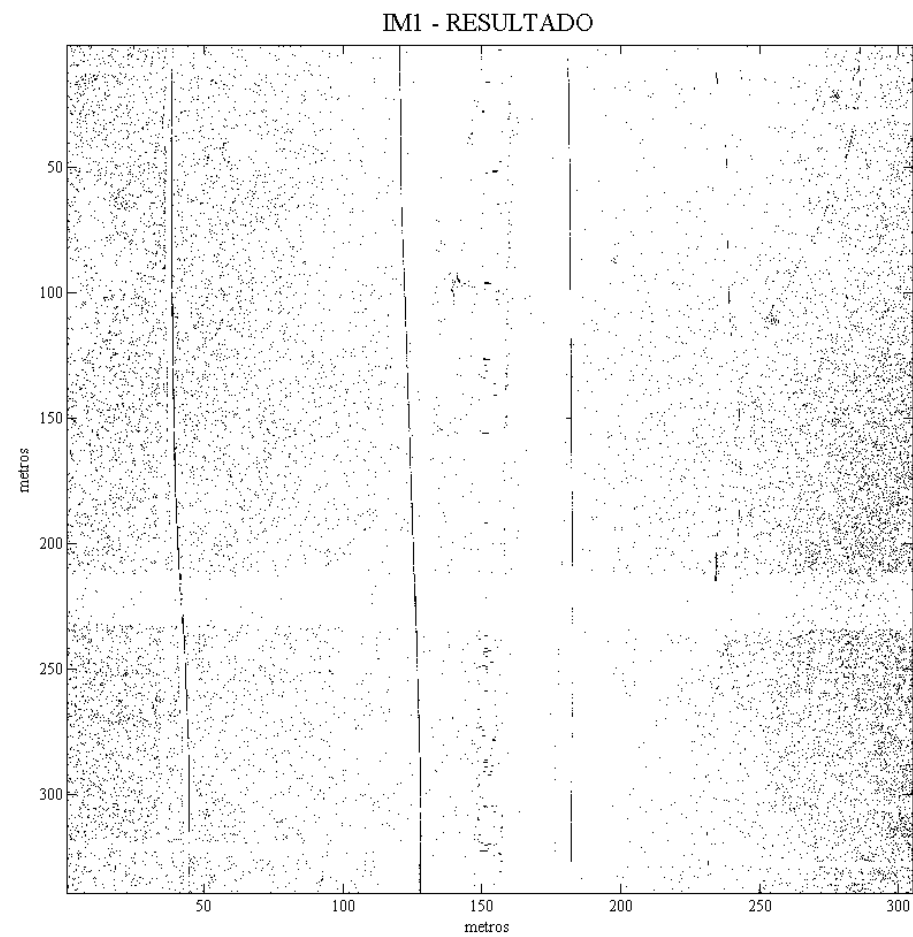
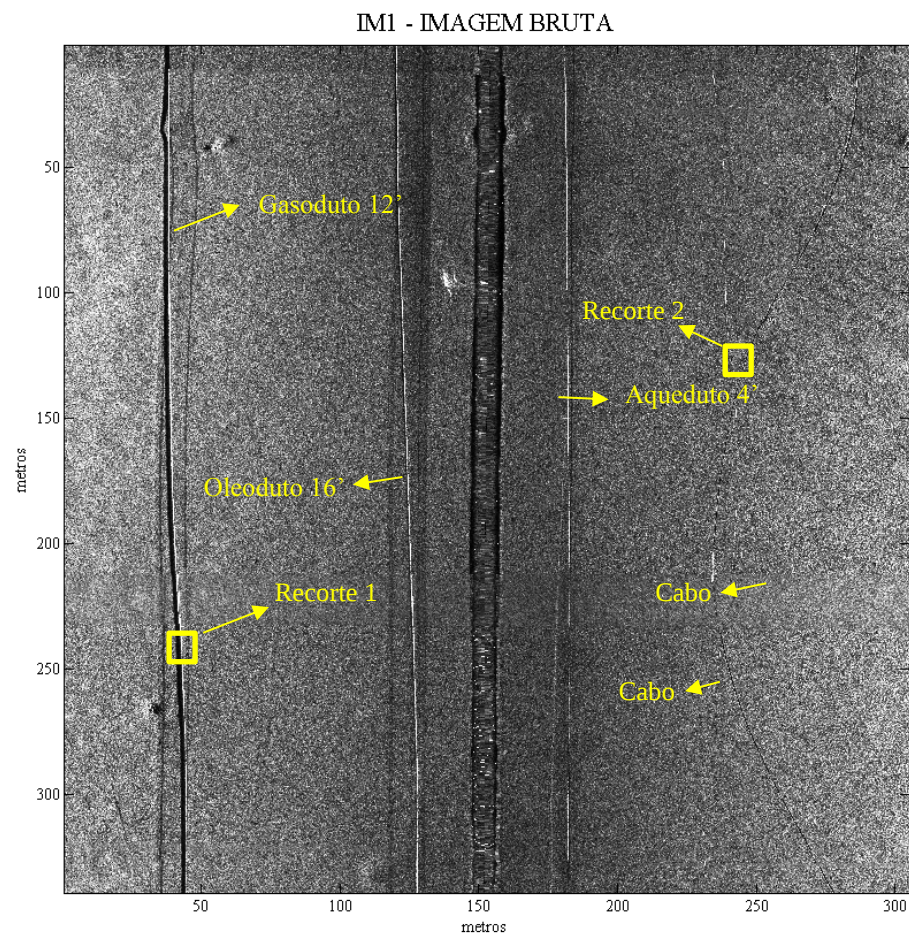


Figura 18 – Resultado da minimização de ruídos *speckle* e melhora na definição dos dutos da IM1.

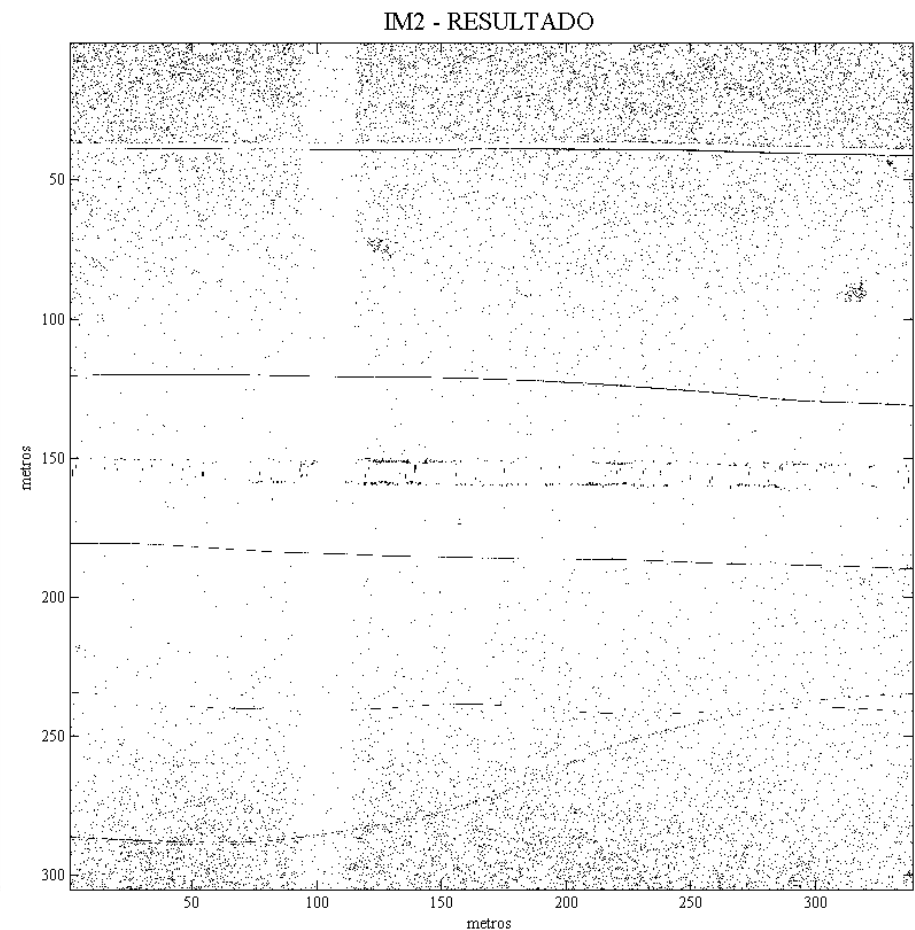
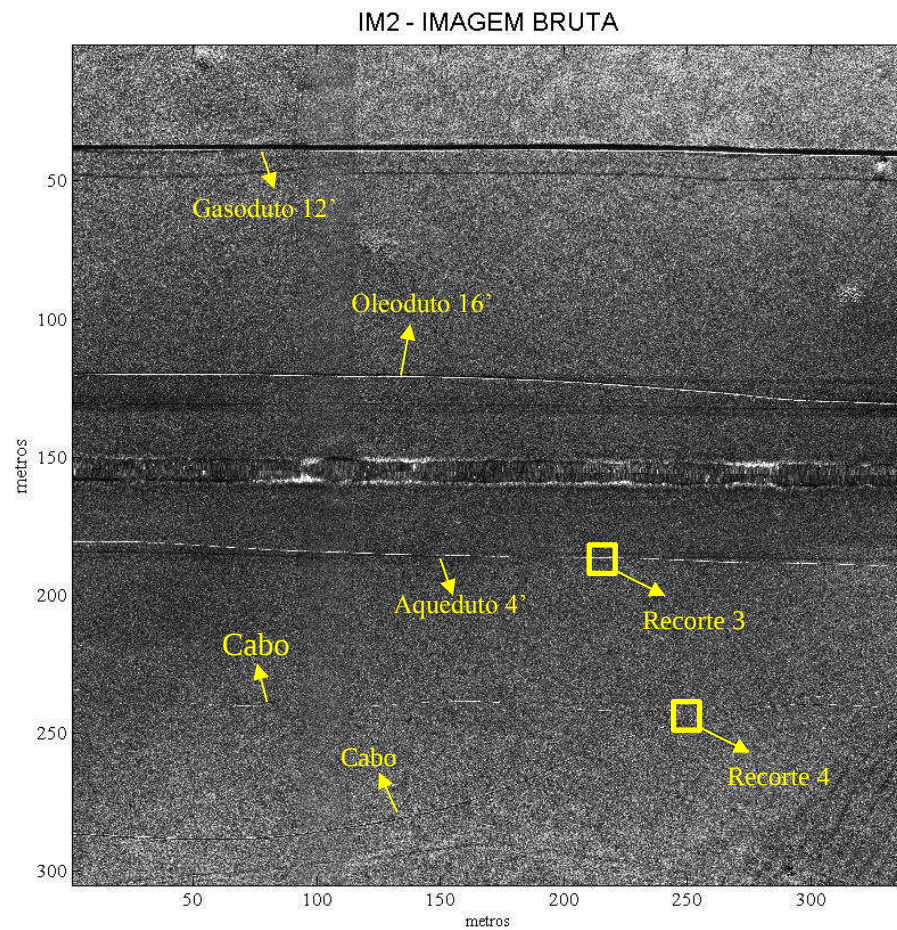


Figura 19 – Resultado da minimização de ruídos *speckle* e melhora na definição dos dutos da IM2.

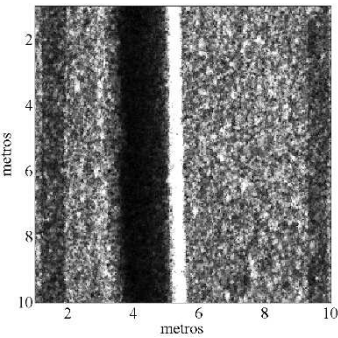
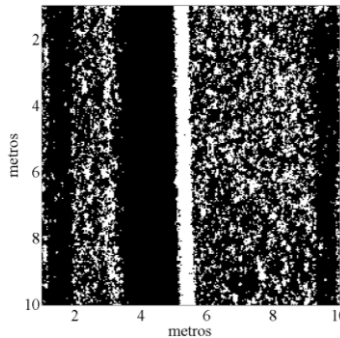
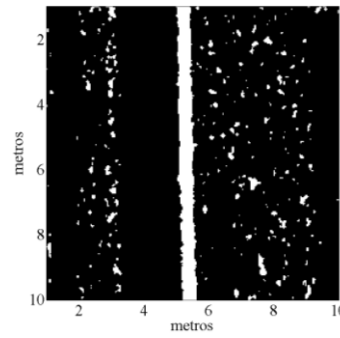
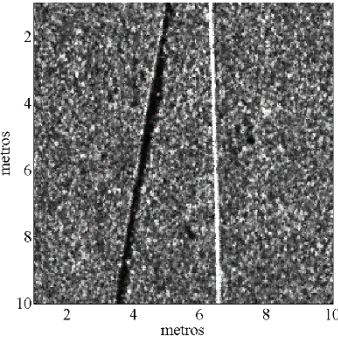
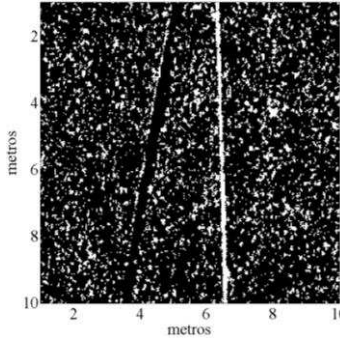
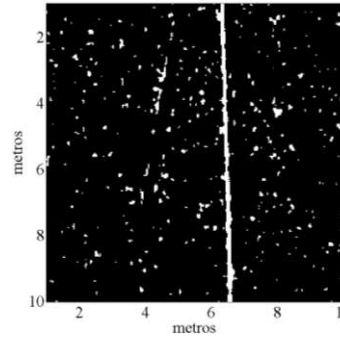
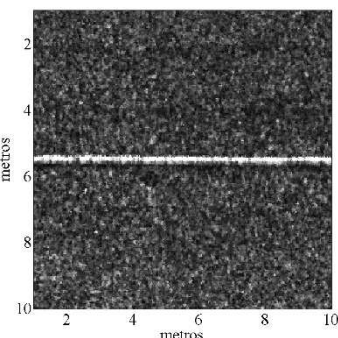
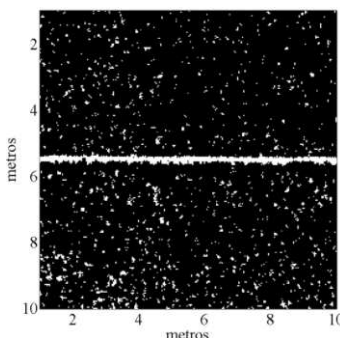
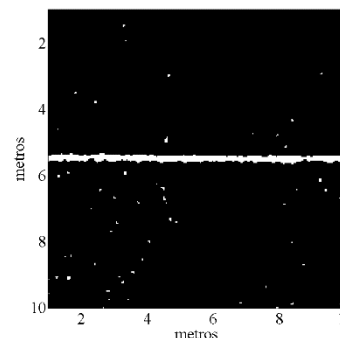
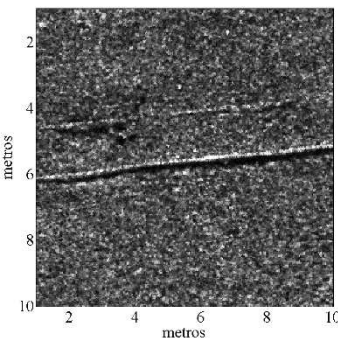
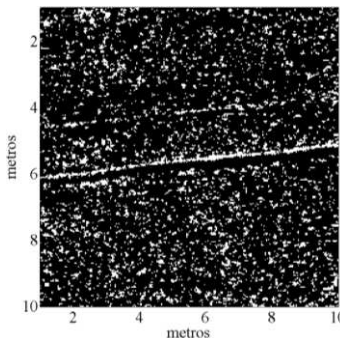
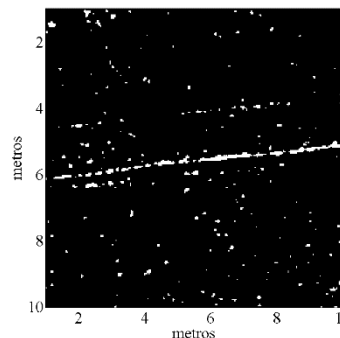
	Imagens brutas	Imagens binarizadas	Resultados C3
Recorte1- IM1			
Recorte2 - IM1			
Recorte3 - IM2			
Recorte4 - IM2			

Figura 20 – Detalhes dos resultados da minimização de ruídos *speckle* e melhora na definição dos dutos das IM1 e IM2.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A melhoria na definição dos objetos de interesse da cena, neste caso os dutos, nas imagens M1 e IM2, com aumento do realce das dessas feições lineares em 0,2% e 1,2% conjuntamente com a redução significativa de 14,4% e 6,9% do ruído foram alcançadas, principalmente, pelo tratamento nas imagens “brutas” com uso das técnicas realce de imagem.

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que entre os níveis de binarização o nível de 60% apresentou a melhor relação objeto/ruído. Os filtros adaptativos apresentaram performance semelhantes e os filtros morfológico *Tophat* e *Stretching* não tiveram boa performance individualmente, mas em conjunto com as outras técnicas de PDI foram eficientes.

Os alvos com pequenos diâmetros tiveram as suas feições suprimidas por apresentarem-se semelhantes aos ruídos *speckle*, sendo mais afetado portanto, que os outros alvos, no processo de remoção dos ruídos.

As análises quantitativas e visuais mostraram que a utilização de técnicas de PDI é uma poderosa ferramenta na redução dos ruídos *speckle* e na melhoria da caracterização dos dutos, em imagens de sonar de abertura sintética, permitindo assim, que processamentos semiautomatizados mais eficazes e rápidos sejam realizados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Petrobrás S.A. e aos seus engenheiros André Luiz Neves de Souza e Marksuel Xavier Bastos pela incentivo e concessão de uso das imagens de SAS dessa pesquisa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

ABREU, E. S., FONSECA, L. M. G., SANTOS, C. P. F., & Ribeiro, V. O.. CLOUD Detection Tool. Uma ferramenta para a detecção de nuvens e sombras em imagens de satélite. In: **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 4234-4241, 2013.

BUEMI, M. E.; FRERY, A. C.; RAMOS, H. S. Speckle reduction with adaptive stack filters. **Pattern Recognition Letters**, v. 36, p. 281-287, 2014.

CHAILLAN, F.; FRASCHINI, C.; COURMONTAGNE, Philippe. Speckle noise reduction in SAS imagery. **Signal Processing**, v. 87, n. 4, p. 762-781, 2007.

CHANUSSOT, J.; MAUSSANG, F.; HÉTET, A.. Scalar image processing filters for speckle reduction on synthetic aperture sonar images. In: **OCEANS'02 MTS/IEEE. IEEE**, 2002. p. 2294-2301.

FACON, J. **Morfologia Matemática: Teorias e Aplicações**. Curitiba: Editora Universitária Champagnat da Pontifícia Universidade Católica do Paraná. 1996. 320p.

FRERY, A. C.; SANT'ANNA, S. J. S. Redução de ruído em imagens SAR pelo uso de filtros robustos. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 7, p. 433-442, 1993.

FROST, V. S.; STILES, J. A.; SHANMUGAN, K. S.; HOLTZMAN. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. **IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence**, n. 2, p. 157-166, 1982.

HEYGSTER, G. Rank filters in digital image processing. **Computer Graphics and Image Processing**, v. 19, n. 2, p. 148-164, 1982.

HURTÓS, N., PALOMERAS, N., Carrera, A., e Carreras, M.. Autonomous detection, following and mapping of an underwater chain using sonar. **Ocean Engineering**, v. 130, p. 336-350, 2017.

MELO, J.; MATOS, A.. Survey on advances on terrain based navigation for autonomous underwater vehicles. **Ocean Engineering**, v. 139, p. 250-264, 2017.

KANG, G. Digital image processing. **Quest**, vol. 1, Autumn 1977, p. 2-20., v. 1, p. 2-20, 1977.

KUAN, D.; SAWCHUK, A.; STRAND, T.; CHAVEL, P. Adaptive restoration of images with speckle. **IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing**, v. 35, n. 3, p. 373-383, 1987.

LEE, J. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. **IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence**, n. 2, p. 165-168, 1980.

LEPORTIER, T.; PARK, M. Filter for speckle noise reduction based on compressive sensing. **Optical Engineering**, v. 55, n. 12, p. 121724-121724, 2016.

MEDEIROS, N.; SILVA, E. A.; NOGUEIRA, J. R. Segmentação morfológica de imagens utilizando o gradiente morfológico multi-escala. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 54, 2002.

PAN, X., CHEN, Q., XU, W., LI, J., e Sun, F.. Shallow-water wideband low-frequency synthetic aperture sonar for an autonomous underwater vehicle. **Ocean Engineering**, v. 118, p. 117-129, 2016.

SANT'ANNA, S. J. S.; MASCARENHAS, N. Comparação do desempenho de filtros redutores de "speckle". **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 8, p. 871-877, 1996.

SERRA, J. **Image analysis and mathematical morphology**. London: Academic Press, 1982. 610 p.

SOILLE, P. **Morphological Image Analysis: Principles and Applications**. 2. ed. Berlin: Springer, 2003. 392 p.

TSO, B.; MATHER, P. **Classification methods for remotely sensed data**. 2. ed. Boca Raton: CRC press, 2009.

CAPÍTULO 3 – IDENTIFICAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DE DUTOS SUBMARINOS EM IMAGENS DE SONAR DE ABERTURA SINTÉTICA

RESUMO

O Sonar de Abertura Sintética (SAS) é um sensor com grande potencial para mapeamentos sistemáticos do fundo marinho e tem sido utilizado por mais de uma década, porém, seu objetivo principal de uso tem sido na detecção de minas em vez de levantamentos hidrográficos. As imagens de SAS são altamente ruidosas devido ao ruído *speckle*, característico de sistemas de imageamento acústico. Esses ruídos reduzem as resoluções espaciais e radiométricas, dificultando a automatização no processamento digital dessas imagens. O objetivo desse estudo é desenvolver uma rotina semi-automática de processamento de imagens de SAS para mapeamento de feições lineares de estruturas submarinas, mais especificamente, dutos submarinos. A metodologia adotada foi composta de quatro etapas: pré-processamento com objetivo reduzir os ruídos e realçar os alvos de interesse; extração de feições visa extrair as feições referentes as estruturas submarinas; pós-processamento tem por finalidade a redução da fragmentação gerada na etapa anterior; e a avaliação com a finalidade de quantificar os resultados obtidos em relação às imagens de referência para estimar o desempenho da metodologia proposta. Os resultados mostraram-se bastante significativos, pois foi possível com o método mapear mais de 80% dos dutos submarinos, o que é muito vantajoso, tendo em vista o grande volume de dados gerados em um mapeamento submarino, tornando fastidiosa uma abordagem manual.

Palavras-chaves: Sonar de abertura sintética, dutos submarinos, AUV, Extração de feições.

ABSTRACT

Synthetic Aperture Sonar (SAS) is a sensor with great potential for systematic seabed mapping and has been in use for over a decade, but its main purpose has been the detection of mines rather than hydrographic surveys. SAS images are highly noisy due to speckle noise, characteristic of acoustic imaging systems. These noises reduce the spatial and radiometric resolutions, making it difficult to automate the digital processing of these images. The goal of this study is to develop a semiautomatic routine of SAS image processing to map linear features of submarine structures, more specifically, submarine pipelines. The methodology used to obtain the mapping of submarine pipelines, characterized by linear submarine structures associated to oil and gas transportation, is composed of four steps. The pre-processing step has as main objective to reduce noise and highlight the targets of interest. The process of features extraction is aimed at extracting the features of interest. Post-processing aims to reduce the fragmentation generated in the previous step and, finally, the evaluation step aims to quantify the results obtained in relation to the reference images to estimate the performance of the proposed methodology. The results were very significant, with more than 80% mapping of the submarine pipelines, which is of great interest, considering the large volume of data generated in a submarine mapping, which makes a manual approach tedious.

Keywords: Synthetic Aperture Sonar (SAS), Submarine Pipelines, Autonomous Underwater Vehicle (AUV), Features Extraction

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, o Sonar de Abertura Sintética (SAS) tem sido usado no mapeamento do leito marinho. As imagens de alta resolução fornecidas pelo SAS são de grande interesse, especialmente para a detecção, localização e, eventualmente, para a classificação de objetos que se encontram no fundo do mar (CHAILLAN, 2007). A viabilidade do SAS como sensor de levantamento hidrográfico parece uma progressão lógica, tendo em vista o benefício do aumento de resolução espacial e qualidade das imagens resultantes. Porém, no levantamento com SAS torna-se necessário uma plataforma de levantamento estável, como um Veículo Autônomo Subaquático (AUV), na execução de um levantamento hidrográfico do fundo marinho (HOGGARTH e KENNY, 2014).

O levantamento hidrográfico com SAS pode fornecer um grande volume de informações do fundo marinho sobre toda a extensão da área mapeada. Segundo Lee et al. (2017) e Hurtós (2017), novas exigências de algoritmos e processamentos são necessários para suportar o grande volume de dados, reduzir o ruído *speckle* e a necessidade de processamento, praticamente, em tempo real. Segundo Cho e Yu (2015) e Leier et al. (2015), muitos algoritmos de processamento de imagem para detecção e reconhecimento automático poderiam ser adotados para o processamento de dados de imagem de sonar. Porém, o processamento de imagem pode resultar em resultados insatisfatórios devido a característica ruidosa da imagem de sonar.

Assim, para a identificação e determinação de feições de interesse, como cabos e dutos em imagens do SAS, que apresenta característica ruidosa e baixa qualidade visual, comparadas com sensores de imageamento terrestre, uma abordagem manual é bastante dificultada. Além disso, deve-se considerar também que um processo automatizado ou parcialmente automático no mapeamento de dutos torna-se fundamental mediante o grande volume de dados em levantamentos hidrográficos.

Diante disto, objetivo desse estudo é desenvolver uma rotina com processamento semiautomático o processamento de imagens de SAS para mapeamento de feições lineares de estruturas submarinas.

2 IMAGEM DO SAS

As imagens do SAS cedidas para essa pesquisa foram provenientes do levantamento hidrográfico, contratado pela PETROBRÁS S.A., a bordo do veículo autônomo subaquático (*Autonomous Underwater Vehicle* – AUV), na Bacia de Campos. Utilizaram-se duas imagens adquiridas pelo sonar HISAS 1030 da Kongsberg com as seguintes características: frequência de 50kHz a 120kHz, resolução espacial de 4x4 cm e resolução radiométrica de 8bits (0-255).

A imagem ilustrada na Figura 1 tem dimensões de 340 metros de largura e 140 metros de altura que correspondem à 6795 colunas *por* 2785 linhas, a qual será denominada aqui por IMAGEM 1 e possui cabos, Árvore de Natal (AN) e dutos flexíveis com diâmetros de 4 e 8 polegadas.

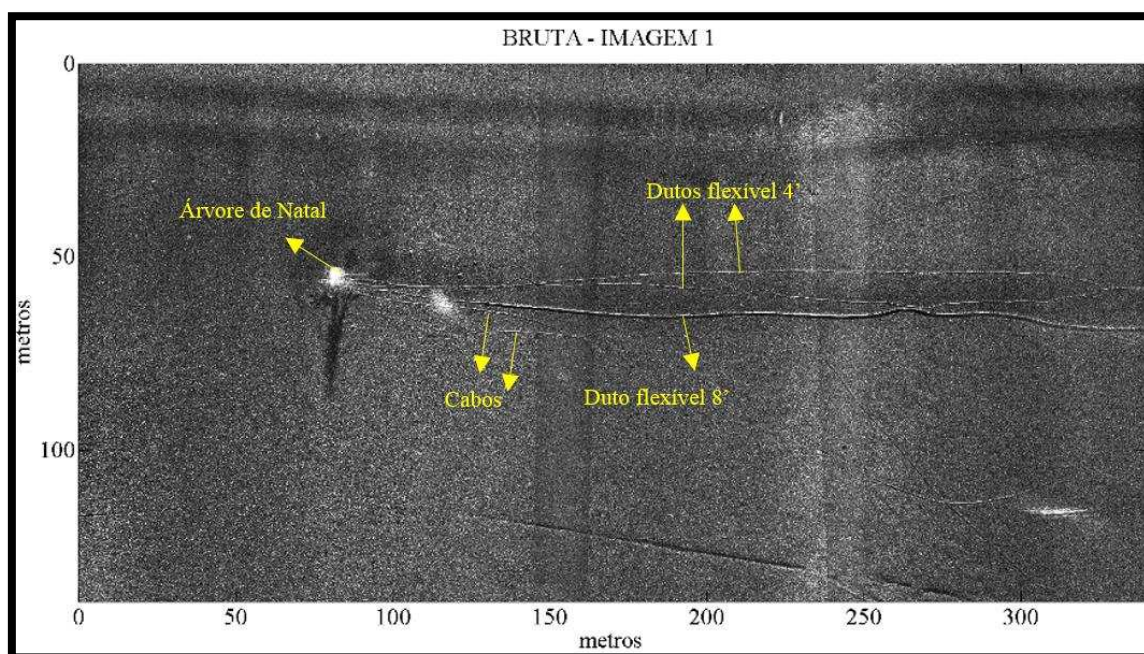


Figura 1 – IMAGEM 1: trecho de uma imagem SAS obtida do levantamento hidrográfico a bordo do AUV.

Na Figura 2 é ilustrada a segunda imagem, denominada IMAGEM 2, com 448 metros de largura e 160 metros de altura que correspondem à 8971 colunas por 3231 linhas.

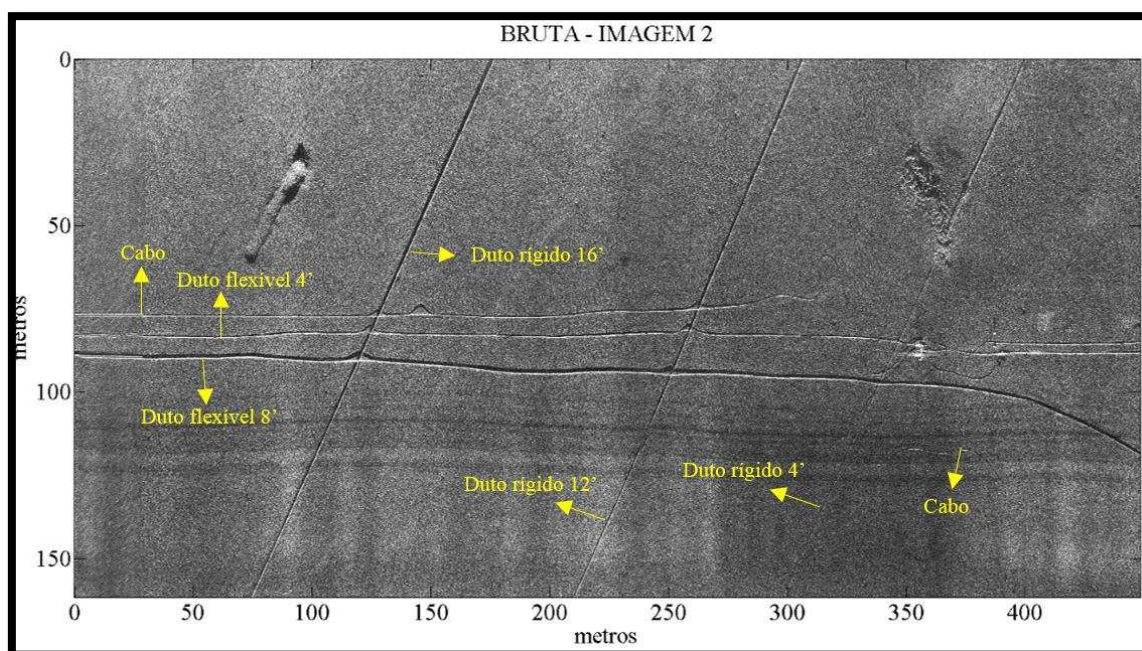


Figura 2 – IMAGEM 2: outro trecho de uma imagem SAS obtida do levantamento hidrográfico a bordo do AUV.

A Tabela 1 apresenta o quantitativo presente de informações na IMAGEM 1 e IMAGEM 2 em relação ao fundo marinho, árvore de natal, cabos e dutos submarinos. Essas informações foram obtidas das imagens de referência.

Tabela 1 – Composição de áreas da IMAGEM 1 e IMAGEM 2.

	Fundo marinho		(AN)		Dutos		Cabos	
	m ²	%	m ²	%	m ²	%	m ²	%
IMAGEM1	47.290	99,35	30	0,06	154	0,32	124	0,26
IMAGEM2	71.165	99,28	-----	-----	387	0,54	127	0,18

3 IDENTIFICAÇÃO DE ESTRUTURAS SUBMARINAS EM IMAGENS DE SAS

A metodologia adotada para obter o mapeamento de dutos submarinos, caracterizados por estruturas lineares submarinas associadas ao transporte de óleo e gás, é composta de quatro etapas, conforme fluxograma da Figura 3.

- Etapa 1 - é a etapa de pré-processamento tem como objetivo fundamental reduzir os ruídos e realçar os alvos de interesse;
- Etapa 2 - é a etapa de extração de feições visa-se extrair as feições referentes as estruturas submarinas associadas ao transporte de óleo e gás;
- Etapa 3 - é a etapa de pós-processamento tem por finalidade a redução da fragmentação gerada na etapa anterior;

- Etapa 4 - é a etapa de avaliação visa quantificar os resultados obtidos em relação às imagens de referência para estimar o desempenho da metodologia proposta.



Figura 3- Fluxograma metodológico do mapeamento de estruturas submarinas.

3.1 Pré-processamento

De modo geral, as técnicas de pré-processamento são aplicadas nas imagens brutas a fim de melhorar sua qualidade visual, realçando a representação das estruturas submarinas e reduzindo os ruídos, Figura 4.

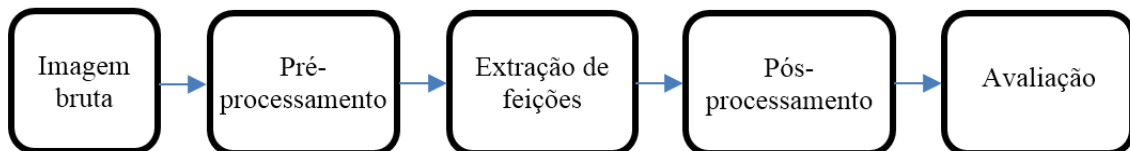


Figura 4- Fluxograma das técnicas de pré-processamento.

Os operadores iniciais utilizados na etapa de pré-processamento foram os filtros adaptativos Frost e o Gamma com máscara de tamanho 3×3 pixels. Esses filtros foram desenvolvidos especificamente para tratamento de imagens de Radar, que possuem características semelhantes as imagens SAS. Estudos mais detalhados de filtros adaptativos com a finalidade de minimizar os ruídos da imagem de radar de abertura sintética podem ser encontrados em Frery et al. (1993), Sant'anna et al. (1996), Tso e Mather (2009) e Buemi et al. (2014).

Além dos filtros citados, utilizou-se o realce de contraste pelo histograma (*Histogram stretching*) com função linear que mapeia os valores de intensidade na imagem de entrada em escala de cinza para novos valores na imagem de saída, de tal forma que 1% dos dados é saturado em intensidades baixas e altas, no início e final do histograma. Isso aumenta o contraste da imagem de saída.

Dentre os filtros morfológicos aplicou-se o filtro *top-hat* com elemento estruturante "*disk*" com raio de 15 pixels. Segundo Facon (1996) o filtro *top-hat* tem boas respostas para geometrias complexas em imagens com fundos heterogêneos e/ou presença de ruídos.

A etapa de binarização teve por finalidade a transformação da imagem em tons de cinza para imagem binária. Os valores utilizados na imagem da etapa de extração de feições e na imagem base, em relação a imagem bruta, foram de 40% e 60%, respectivamente. Por fim, utilizou-se do operador Remove que visa a remoção de agrupamentos de *pixels* menores que 40 *pixels*.

3.2 Extração de feições

Nessa etapa foi utilizada a classificação orientada a objetos com a função *Rule Based Feature Extraction Workflow* da *toolbox Feature Extraction* no software ENVI 5.0. Para essa classificação se utilizou das imagens resultantes do pré-processamento realizado na etapa anterior, com o objetivo de identificar dutos submarinos e o fundo marinho. As regras para identificação do alvo de interesse foram espaciais dos tipos: *Elongation* maior que 3,5 e área entre os valores de 50 e 50.000 *pixels*. As áreas que não foram classificadas como estruturas submarinas foram consideradas com fundo marinho.

3.3 Pós-processamento

Utilizou-se a função de histerese implementada no Matlab 2013a, com objetivo de completar as bordas que foram suprimidas no pré-processamento e/ou não identificadas na extração de feições. Segundo Ray (2013), a função Histerese é baseada no uso de um limiar alto para identificar um conjunto de *pixels* como pontos de borda sem considerar suas informações de conectividade, *pixels* acima do limiar são tomados como os pontos de borda. Yitzhaky e Peli (2003) e Medina-Carnicer et Al., (2010) descrevem o método como a entrada de uma imagem base (lim1) e outra imagem a ser completada (lim2), referente ao resultado da extração de feições, e a saída é uma imagem com bordas completadas.

A Figura 5 mostra o resultado da aplicação do operador histerese em uma imagem sintética. A imagem lim1 (Figura 5(b)) tem características ruidosas, visto que por tentar manter as informações dos alvos de interesse, muitas feições ruidosas são adicionadas em conjunto, comparada com a imagem de lim2, a imagem lim1 é mais poluída.

A imagem lim2 (Figura 5(a)) é uma imagem com menor quantidade de ruídos, porém as técnicas empregadas para a remoção dos ruídos também suprimem parte das informações do alvo de interesse. Desta forma, utilizam-se as duas imagens na função

histerese, visando a complementação dos trechos perdidos da imagem resultante da extração de feições (lim2), a partir da imagem base (lim1).

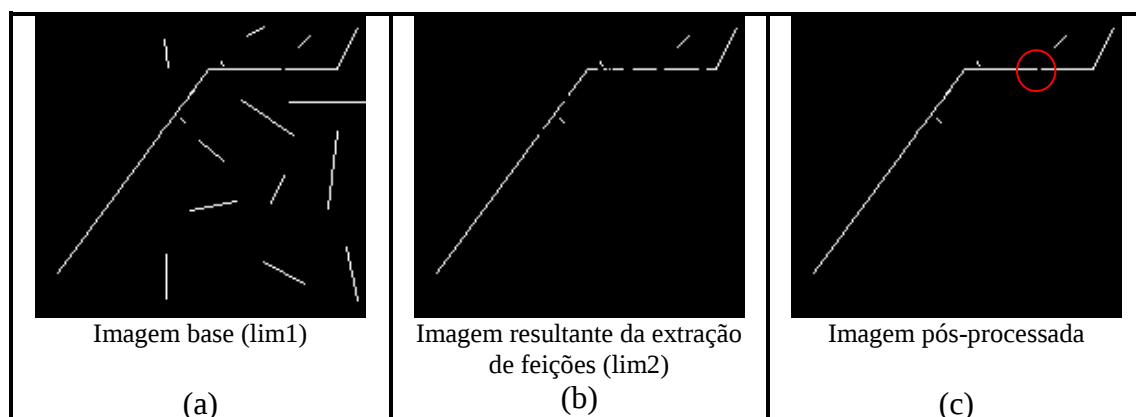


Figura 5 - Aplicação da função Histerese.

Analisando a Figura 5(c), verifica-se que os trechos perdidos da imagem lim2 foram preenchidos, exceto na região ilustrada no círculo vermelho, tendo em vista que este trecho de feição também não existe nas Figuras 5(a) e 5(b), o que justificada a sua não complementação.

3.4 Avaliação dos resultados

No processo de avaliação dos resultados, 8 classes foram analisadas (fundo marinho, duto, árvore de natal e cabos, considerando verdadeiros positivos e falsos positivos) para determinar os erros cometidos pelo processo de mapeamento das estruturas submarinas, essa avaliação foi feita por comparação *pixel a pixel* entre a imagem de referência e a imagem a ser avaliada.

As imagens de referências (Figuras 6 e 7) foram obtidas em função das imagens brutas (Figuras 1 e 2) por método de classificação visual e vetorização manual, sendo consideradas como um dado “verdadeiro” e utilizadas para a realização da avaliação dos resultados. Enquanto que a imagem a ser avaliada corresponde à imagem binária com feições extraídas pelos processos pré-processamento, extração de feições e pós-processamento (itens 3.1, 3.2 e 3.3). A Tabela 2 apresenta as classes temáticas da imagem de referência, imagem classificada e imagem avaliada.

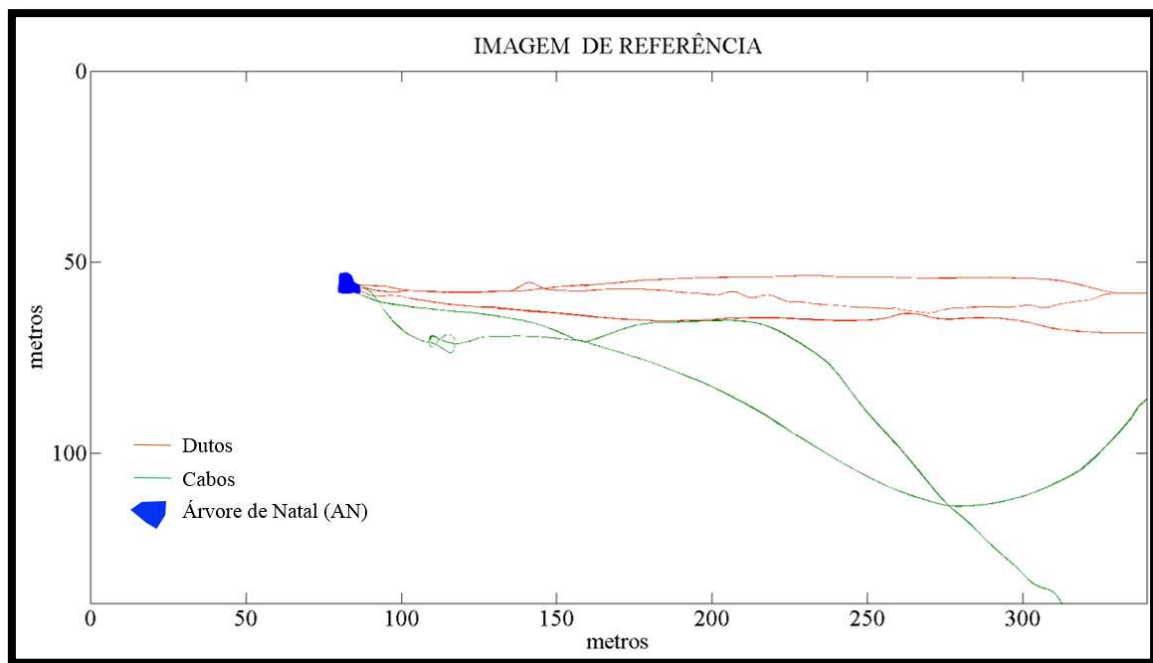


Figura 6 – Imagem de referência 1 referente a IMAGEM 1.

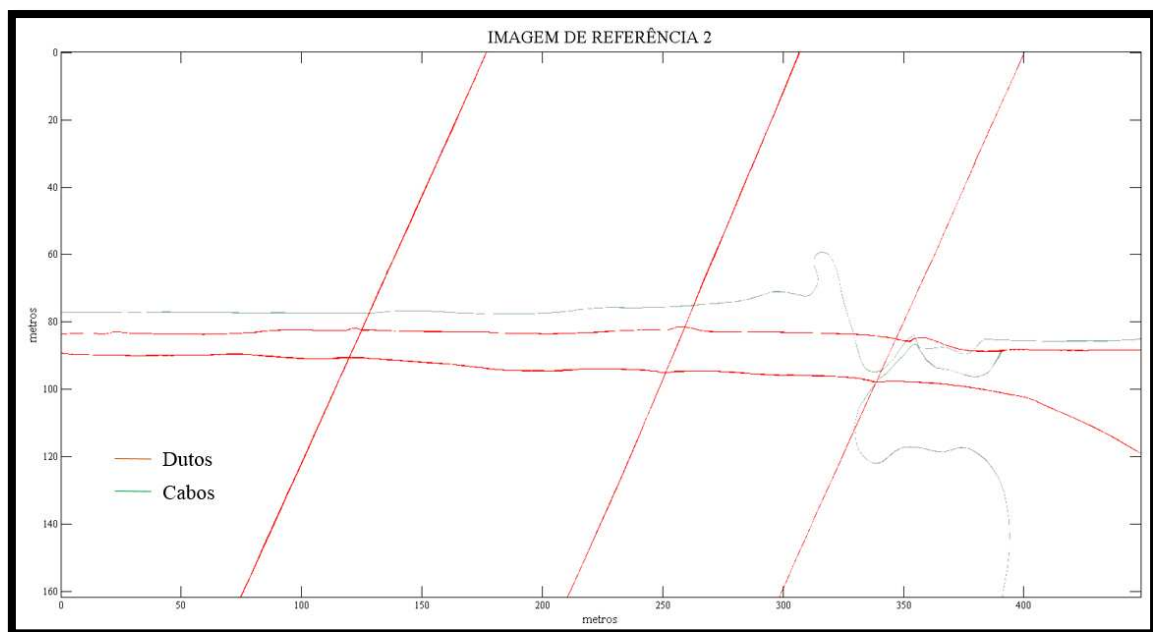


Figura 7 – Imagem de referência 2 referente a IMAGEM 2.

Tabela 2 – Classes temáticas das imagens.

Imagem de referencia	Imagem avaliada	Resultado da avaliação
0=Fundo marinho	0=Fundo marinho (negativo)	0=Fundo marinho (Verdadeiro negativo)
1=Duto		1 =Fundo marinho (Falso positivo)
2= Árvore de Natal (AN)	1 = Instalações submarinas (positivo)	2 =Duto (Falso negativo)
		3 =Duto (Verdadeiro positivo)
		4 = Árvore de natal (Falso negativo)
		5 = Árvore de natal (Verdadeiro positivo)
3=Cabos		6 =Cabos (Falso negativo)
		7 =Cabos (Verdadeiro positivo)

O procedimento para a avaliação da qualidade do mapeamento dos dutos submarinos foi obtido com a soma pixel a pixel entre a imagem de referência e a imagem avaliada, conforme Figura 8. A imagem de referência foi multiplicada por 2 para não ter resultados iguais na avaliação.

Imagem de referencia			Imagem avaliada			Avaliação					
2x	1	0	2	+	0	1	1	=	2	1	5
	2	1	3		0	1	0		4	3	6
	0	0	3		1	0	1		1	0	7

Figura 8 – Demonstração do processo de Avaliação.

O mesmo processo foi realizado para a IMAGEM 2, porém na IMAGEM 2 não possui a classe 2 (árvore de natal) da imagem de referência da Tabela 1, e consequentemente as classes 4 e 5 do resultado da avaliação não são apresentados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente serão apresentadas as imagens com os resultados obtidos em cada fase desse estudo para visualização dos ruídos e dos dutos das estruturas submarinas mapeadas, e posteriormente serão apresentados os gráficos para demonstrar os resultados quantitativos referente a metodologia.

A imagem bruta e os resultados dos procedimentos de pré-processamento, extração de feições e pós-processamento, são apresentados nas Figuras 9 a 16. As Figuras de 9 a 12 representam os resultados referentes a IMAGEM 1, enquanto as Figuras de 13 a 16 representam os resultados referentes a IMAGEM 2.

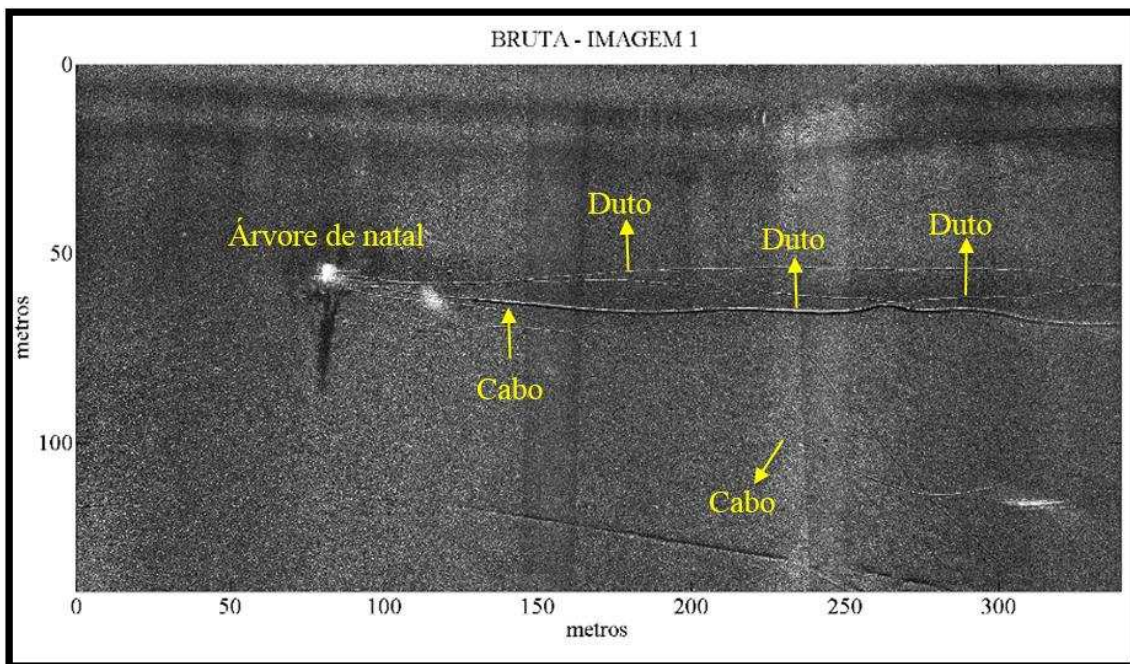


Figura 9 – Imagem bruta da IMAGEM 1.

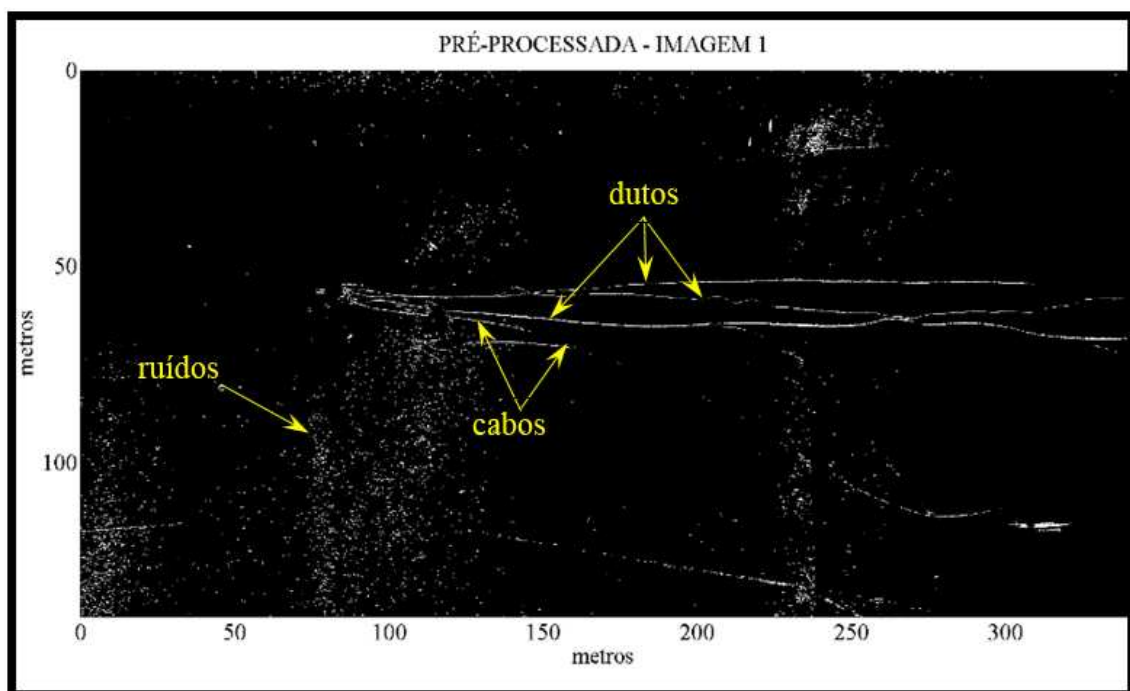


Figura 10 – Imagem do pré-processamento da IMAGEM 1.

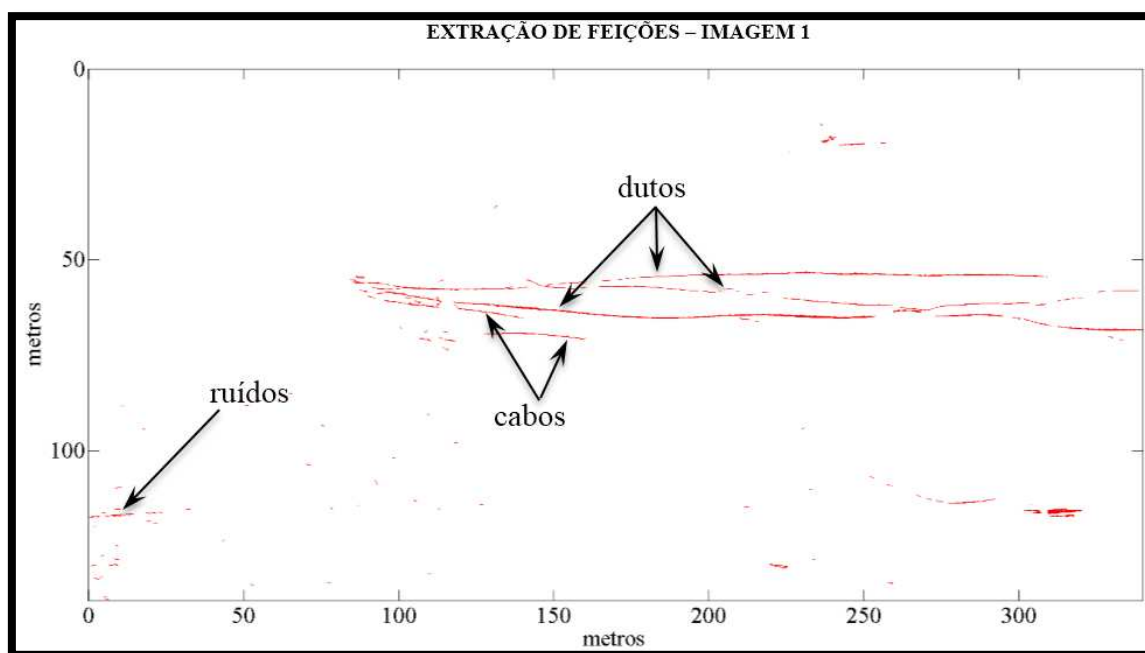


Figura 11 – Imagem da extração de feições da IMAGEM 1.

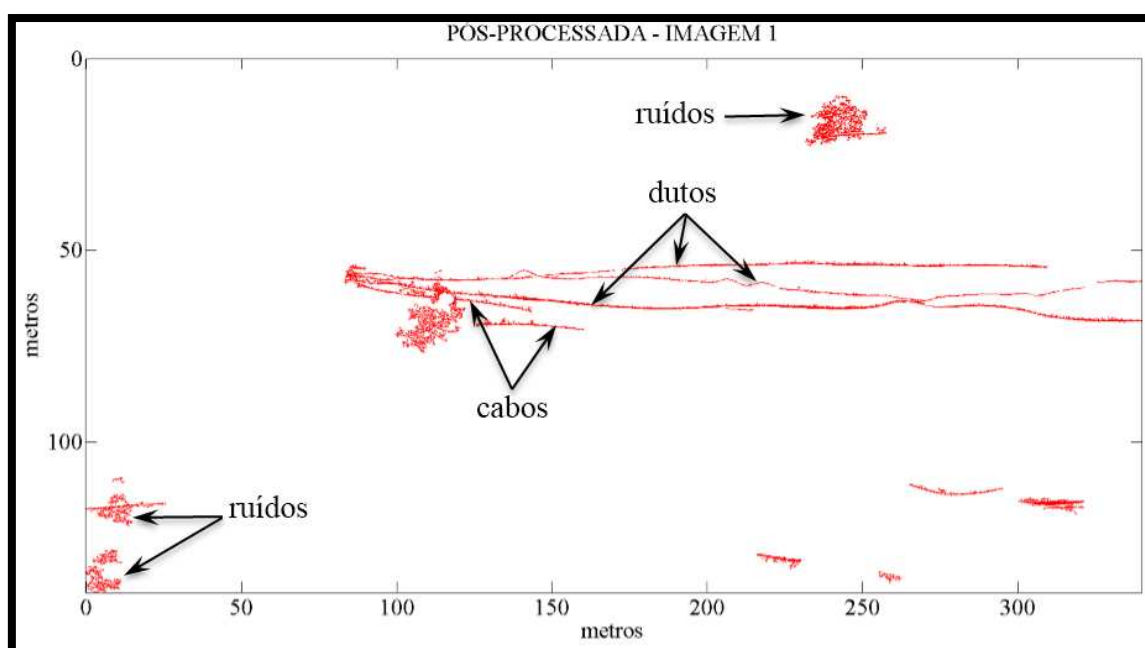


Figura 12 – Imagem do resultado da extração de feições e pós-processamento da IMAGEM 1.

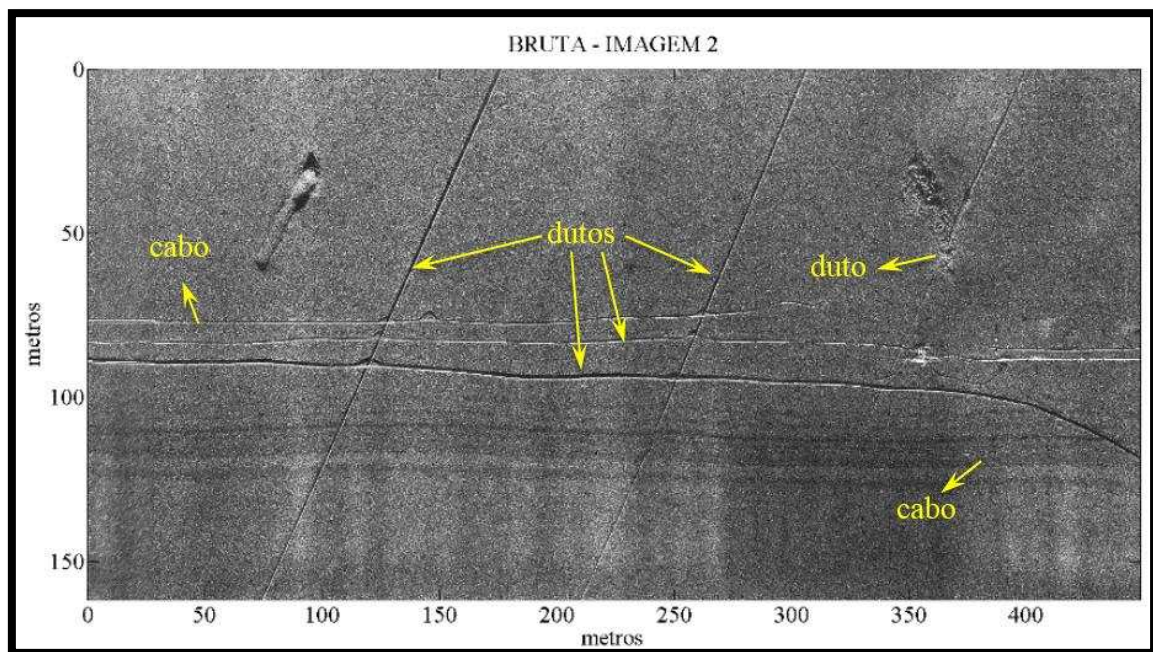


Figura 13 – Imagem bruta da IMAGEM 2.

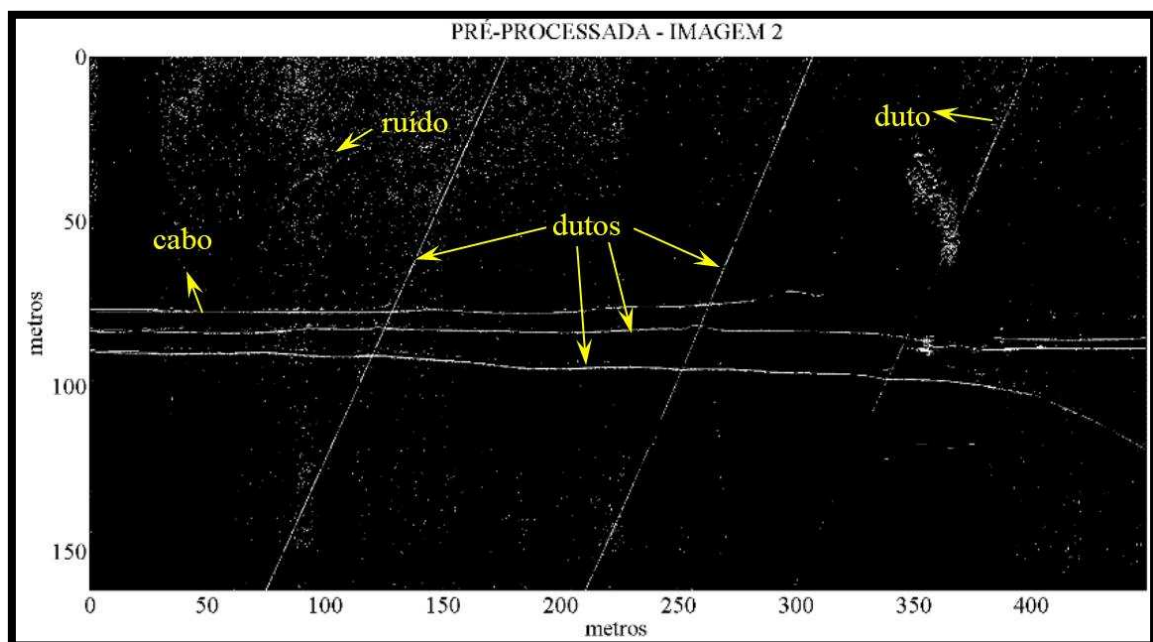


Figura 14 – Imagem bruta e pré-processamento da IMAGEM 2.

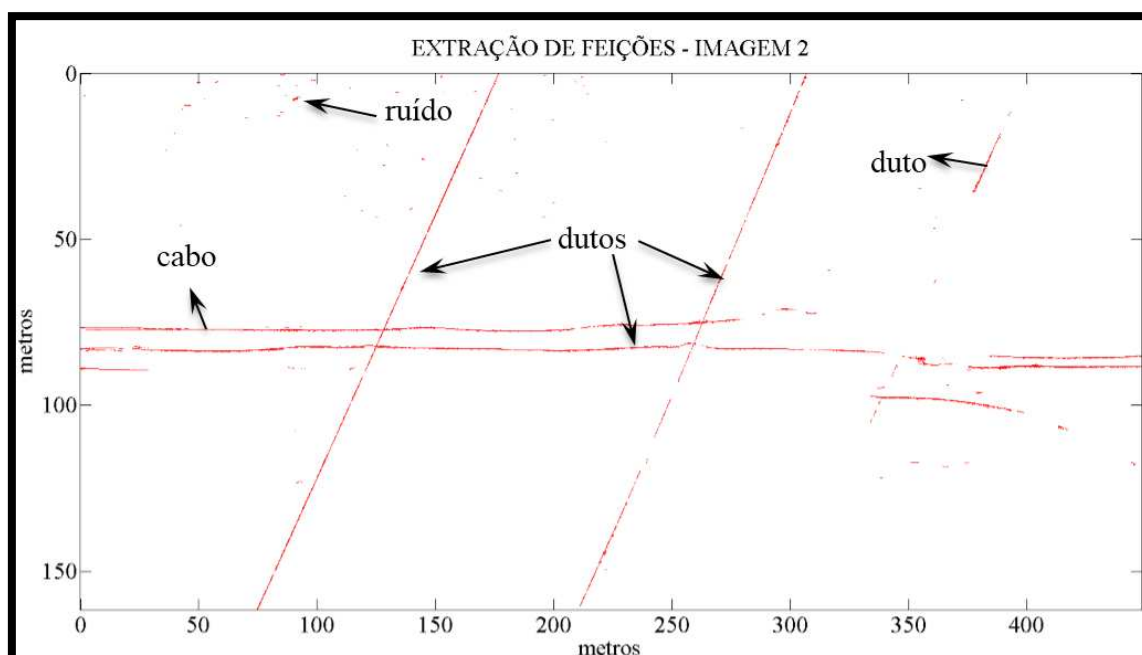


Figura 15 – Imagem da extração de feições da IMAGEM 2.

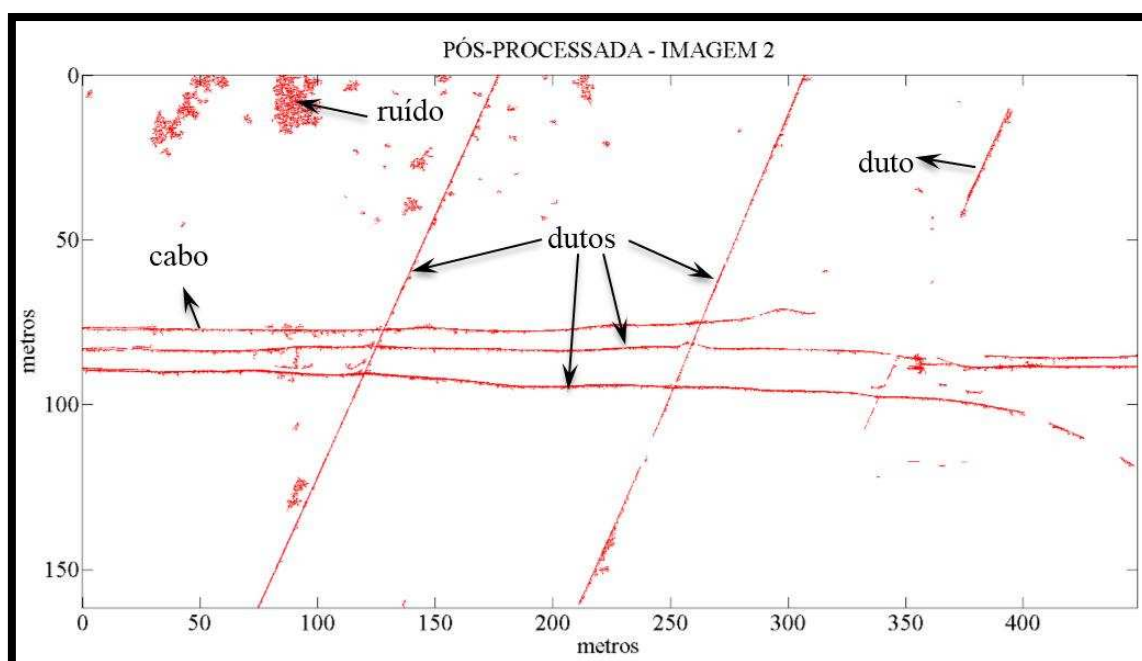


Figura 16 – Imagem do resultado da extração e mapeamento na IMAGEM 2.

Pode ser observado que nas imagens brutas, Figuras 9 e 13, que os cabos possuem baixa capacidade de reflexão do sinal acústico, enquanto os dutos e a árvore de natal possuem maior capacidade de reflexão devido ao tamanho do alvo. Isso ocorre porque os cabos possuem menor diâmetro que os dutos e assim menor área de reflexão. Uma possibilidade de melhorar a reflexão dos cabos, na etapa de levantamento, é diminuir a

altura do AUV em relação ao fundo marinho e a área de varredura para aumentar a resolução da imagem do SAS. As duas soluções, no entanto, resultam em menor produtividade do levantamento, uma vez que deverá ter mais passagem para cobrir a mesma área mapeada. Outra característica importante da imagem de SAS é a grande quantidade de ruídos (efeito *speckle*), onde os alvos acabam sendo confundidos com esses ruídos.

Como dito, na etapa de pré-processamento, as técnicas de PDI utilizadas tinham o propósito de realçar as feições de interesse, neste caso os dutos, e eliminar ao máximo os ruídos. Porém ao tentar eliminar os ruídos provenientes do levantamento submarino os alvos de interesse também são parcialmente suprimidos. É fato que as imagens resultantes das aplicações das técnicas de Pré-processamento ainda apresentam ruídos, bem como alvos de interesse parcialmente suprimidos, porém, em quantidades bem menores, o que evidencia a importância dessa etapa no processo de extração de feições.

No processo de extração de feições houve confusão entre as classes mapeadas, assim os resultados mostram que partes das feições submarinas não são extraídas ou caracterizadas como fundo marinho, enquanto que alguns ruídos são classificados como feições de estruturas submarinas. Vale ressaltar que inicialmente considerou uma classe de ruídos, porém como essa classe apresentou confusão elevada em relação à classe fundo marinho, optou-se por não utilizá-la e, conseqüentemente, grande parte dessa classe foi caracterizada no processo de treinamento como fundo marinho.

Na etapa de pós-classificação, a imagem resultante do processo de extração de feições é reconstituída com referência a imagem base. Dessa forma, algumas feições de interesse que foram perdidas na etapa de extração de feições podem ser recuperadas nessa etapa. Porém, nesse mesmo processo, como pode ser observado nos resultados da pós-classificação, também pode ocorrer um aumento na quantidade de ruídos comparado com o resultado da Extração de feições. No entanto, os resultados mostram que houve uma melhoria na recuperação das feições de interesse. Deve-se ressaltar que ao final do processo, houve uma melhora considerável nos resultados do mapeamento com o uso do operador histerese. A Figura 17 mostra com maior nível de detalhes os resultados referentes às Figuras 9 e 10.

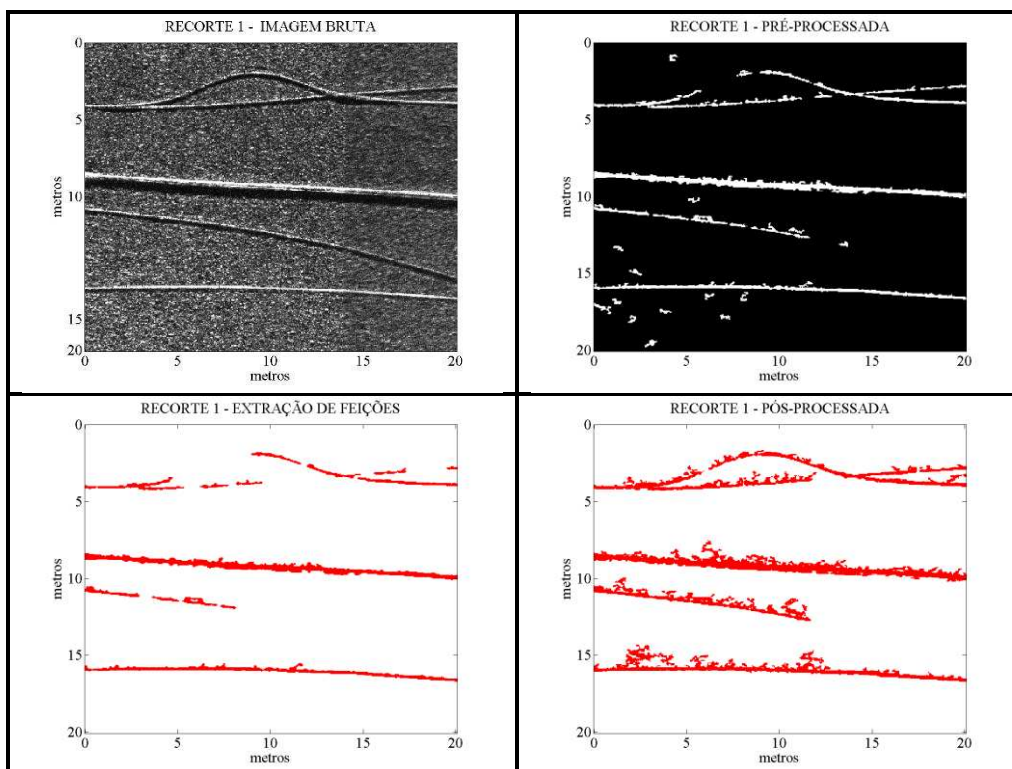


Figura 17 – Recorte 1 referente aos resultados apresentados nas Figuras 9 à 12.

As imagens resultantes apresentadas na Figura 17 mostram que os dutos e os cabos foram bem identificados e caracterizados, mesmo considerando uma alteração evidente de tonalidades na imagem bruta. Também pode-se verificar o potencial da etapa de Pós-processamento para a recuperação de informações suprimidas nas etapas anteriores.

A Figura 18 ilustra com maior detalhe os resultados provenientes das imagens apresentadas nas Figuras 13 à 16, mostrando trecho de dutos que não foram mapeados.

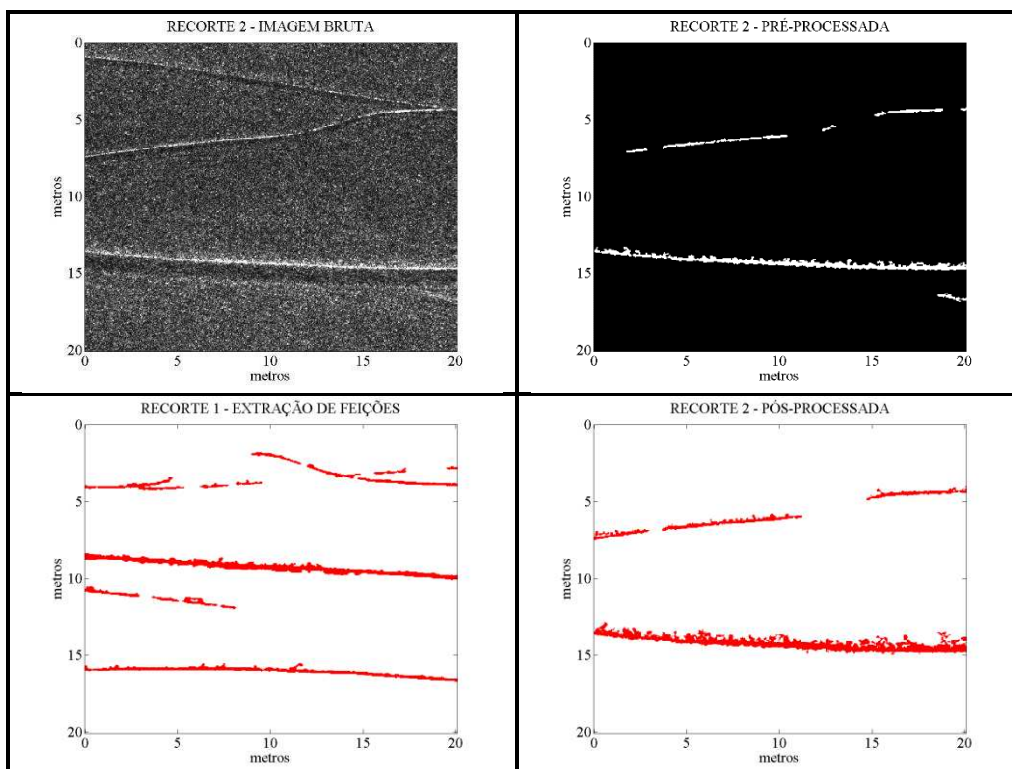


Figura 18 – Recorte 2 referente ao resultado apresentado na Figura 12 à 15.

Uma avaliação quantitativa dos resultados obtidos nesse estudo é apresentada em cada etapa da metodologia para demonstrar sua importância, e se cada etapa atendeu a expectativa proposta. As IMAGEM 1 e IMAGEM 2 tiveram seus resultados avaliados em relação a imagem bruta com binarização de 60%, pré-processamento para a imagem base, extração de feições e pós-processamento. Os gráficos das Figuras 19 e 20 mostram a quantidade de estruturas submarinas mapeadas em comparação com as imagens 1 e 2, os resultados são apresentados pelo o nível de acerto utilizada pelo método de avaliação proposto (item 3.3).

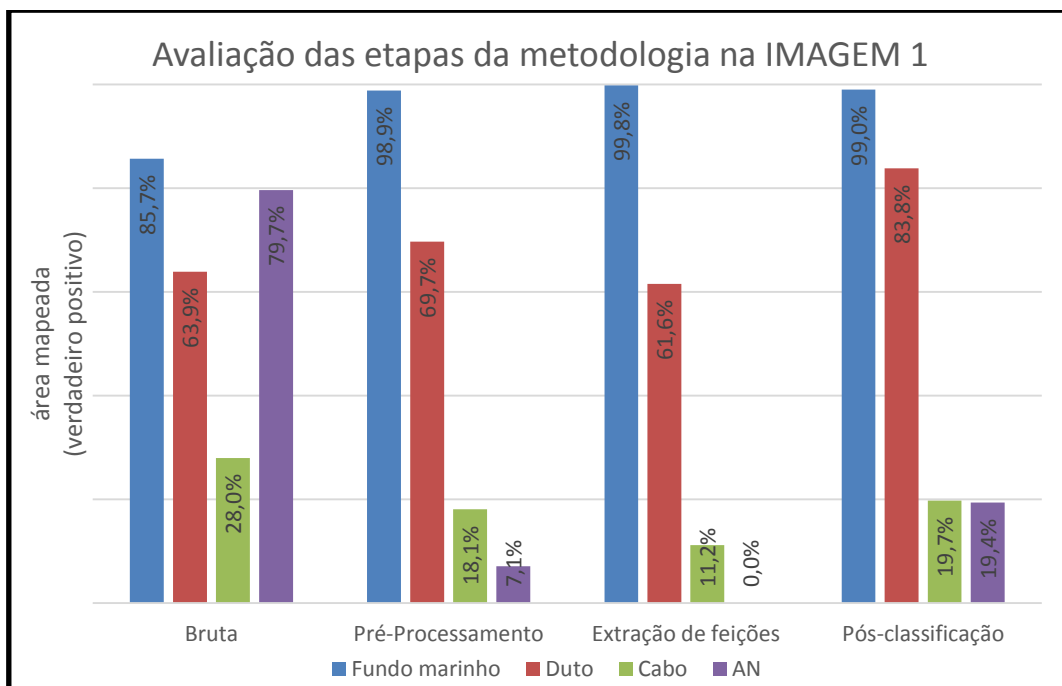


Figura 19 – Avaliação do mapeamento na IMAGEM 1.

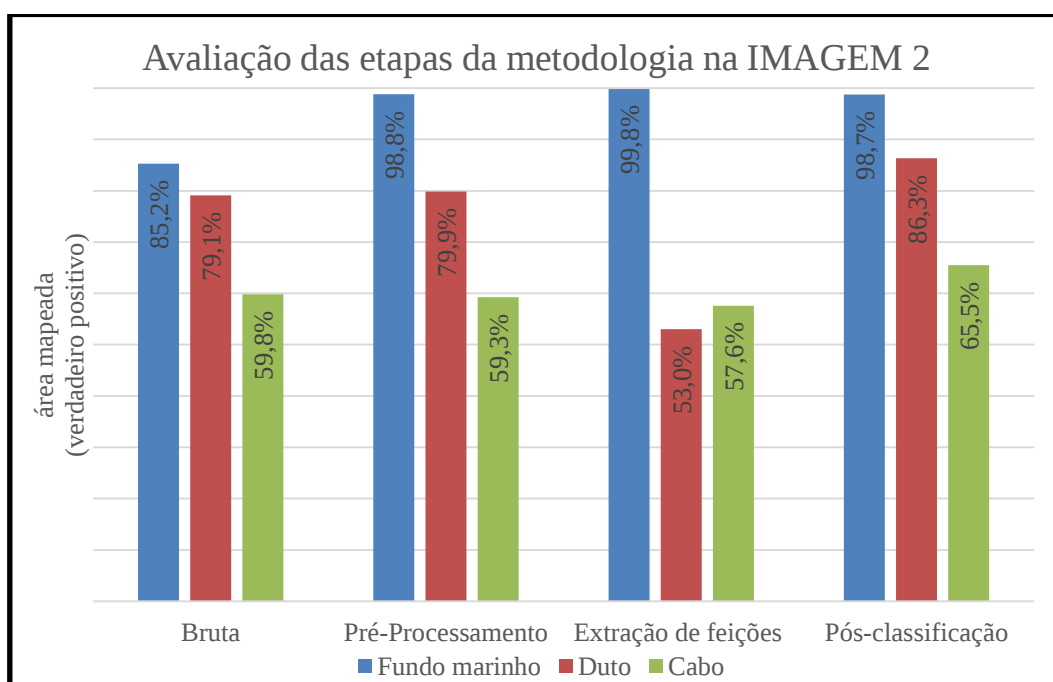


Figura 20 – Avaliação do mapeamento na IMAGEM 2.

Vale ressaltar que os alvos de interesse nas imagens SAS desse estudo são identificados por seus Níveis Digitais (ND), ou seja, valores de brilho ou níveis de cinza, onde os valores mais altos representam as estruturas submarinas devido a maior reflexão das ondas acústicas. Por outro lado, devido a vários fatores que ocorrem na aquisição dessas imagens, tais imagens possuem característica ruidosa, sendo os ruídos também

caracterizados por valores de ND altos, o que dificulta a sua eliminação quando se quer manter os alvos de interesse.

De modo geral, pode ser observado nos gráficos das Figuras 19 e 20 os seguintes resultados:

- A imagem bruta apresentou o nível de acerto no mapeamento da classe temática “Fundo marinho” para IMAGEM 1 e IMAGEM 2 de 85,7% ou 40.793 m² e de 85,2% ou 61.071m², respectivamente. Dessa forma a quantidade de ruídos que corresponde ao erro no mapeamento foi de 14,3% ou 6.807 m² e de 14,8% ou 10.609 m². Com os resultados apresentados evidencia-se que a imagem bruta é bem ruidosa. Porém, o ideal para o mapeamento das estruturas submarinas é conseguir separar o “Fundo marinho” dos alvos de interesse para que não haja confusão entre as classes temáticas;
- A etapa de pré-processamento reduziu, comparados com os resultados da imagem bruta, significativamente em mais 13,2% para ambas imagens a quantidade de ruídos do “Fundo marinho”, melhorou em 5,8% para a IMAGEM 1 e 0,8% para a IMAGEM 2 o nível de acerto do “Duto”, na classe temática “Cabo”, houve a redução de modo moderado em 0,8% para a IMAGEM 2 e uma redução significativa em 9,9% para IMAGEM 1. Essa redução é devido à menor reflexão do alvo na IMAGEM 1, que ocasionou a semelhança entre os cabos e ruídos e, na classe “AN”, reduziu em 10 vezes o nível de acerto da área mapeada. Essa significativa redução é justificada em função da forma não linear dos alvos presentes na classe “AN”, e pelo fato de que, no pré-processamento preserva as formas lineares. Os resultados mostraram que essa etapa foi eficaz com seu objetivo porque reduziu os ruídos e realçou as estruturas submarinas com feições lineares;
- A etapa de extração de feições separou o “Fundo marinho” das estruturas submarinas, e conseqüentemente, comparados com os resultados da imagem do Pré-processamento, reduziu os ruídos em 1,0% para a IMAGEM 1 e IMAGEM 2, e a classe “Duto” teve a sua área mapeada, nível de acerto, reduzida em 8,2% para IMAGEM 1 e 26,8% para a

IMAGEM 2, essa redução significativa foi devido as regiões que possuem semelhanças com os ruídos;

- A etapa de pós-processamento restaurou feições de dutos submarinos suprimidas pelas duas etapas anteriores com acerto no mapeamento da classe temática “Duto” para IMAGEM 1 e IMAGEM 2, respectivamente, de 83,8% ou 39.889 m² e de 86,3% ou 61.860 m². O aumento de acerto no mapeamento dessa etapa em relação a etapa de extração de feições foi de 22,3% na IMAGEM 1 e 33,3% na IMAGEM 2 referente a classe “Duto”, na classe “Cabo” foi de 8,6% na IMAGEM 1 e 7,9% IMAGEM 2 e na classe “AN” foi de 19,4% na IMAGEM 1. Porém, na classe “Fundo marinho” houve redução de nível de 0,8% na IMAGEM 1 e 1,1% na IMAGEM 2, essas reduções foram devido a confusão entre os ruídos, que não foram suprimidos nas etapas anteriores, com as estruturas submarinas. Dessa forma, os ruídos devem ser reduzidos ao máximo em todas as etapas do metodológicas para que não haja confusão entre ruído e os alvos de interesse.

Como pode ser observado os dutos não mapeados possuem uma baixa reflexão em relação ao fundo marinho, dificultando sua detecção, desde o início do processo. A reflexão pode ser afetada por vários motivos, como, o duto estar enterrado ou parcialmente enterrado, os dados estarem muito ruidosos no processo de aquisição, o duto estar perpendicular ao trajeto de levantamento do AUV, escala incompatível com o tamanho do objeto de interesse e se o sedimento tiver uma textura grossa e o duto tiver diâmetro pequeno, pode haver uma confusão na identificação do duto.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conclui-se que os objetivos foram alcançados, visto que de modo geral, os resultados foram bastante significativos, com mapeamento maior que 80% das feições de interesse, no caso dos dutos. Considerando um processo semiautomático, essa porcentagem é de grande interesse, tendo em vista o grande volume de dados para as aplicações das imagens SAS no mapeamento marinho, portanto moroso num processo manual.

A etapa de pré-processamento foi crucial para o realce das feições de interesse e redução dos ruídos. Os operadores comumente utilizados para imagens de radar, apresentaram resultados satisfatórios também para imagens SAS. A etapa de extração de feições foi importante na caracterização do fundo marinho e das estruturas submarinas, e também reduziu significativamente os ruídos indesejáveis para o processamento na etapa de pós-processamento. Esta apresentou uma ótima desempenho na conexão das feições lineares, assim identificando os dutos com altos níveis de acerto.

Diante dos estudos realizados recomenda-se que sejam utilizadas imagens SAS aprimoradas em relação a sua aquisição com intuito de diminuir a poluição causada pelos ruídos e assim melhorar a relação sinal/ruído da imagem, além disso, unificar as técnicas de processamento digital de imagem para automatizar o processo de mapeamento de dutos submarinos, e por fim, testar essa metodologia em imagem de sonar de varredura lateral.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Petrobrás S.A. e aos seus engenheiros André Luiz Neves de Souza e Marksuel Xavier Bastos pela incentivo e cessão de uso das imagens de SAS dessa pesquisa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

BUEMI, M. E.; FRERY, A. C.; RAMOS, H. S. Speckle reduction with adaptive stack filters. **Pattern Recognition Letters**, v. 36, p. 281-287, 2014.

CHAILLAN, F.; FRASCHINI, C.; COURMONTAGNE, Philippe. Speckle noise reduction in SAS imagery. **Signal Processing**, v. 87, n. 4, p. 762-781, 2007.

CHO, H.; YU, S. Real-time sonar image enhancement for AUV-based acoustic vision. **Ocean Engineering**, v. 104, p. 568-579, 2015.

FACON, J. **Morfologia Matemática: Teorias e Aplicações**. Curitiba: Editora Universitária Champagnat da Pontifícia Universidade Católica do Paraná. 1996. 320p.

FRERY, A. C.; SANT'ANNA, S. J. S. Redução de ruído em imagens SAR pelo uso de filtros robustos. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 7, p. 433-442, 1993.

HOGGARTH, A.; KENNY, K. Using synthetic aperture sonar as an effective hydrographic survey tool. In: **Oceans-St. John's**, 2014. IEEE, 2014. p. 1-12.

HURTÓS, N.; PALOMERAS, N.; CARRERA, A.; CARRERAS, M. Autonomous detection, following and mapping of an underwater chain using sonar. **Ocean Engineering**, v. 130, p. 336-350, 2017.

LEE, Y.; Choi, J.; Ko, N. Y.; Choi, H. T. Probability-Based Recognition Framework for Underwater Landmarks Using Sonar Images. **Sensors**, v. 17, n. 9, p. 1953, 2017.

LEIER, S.; FANDOS, R.; ZOUBIR, A. M. Motion Error Influence on Segmentation and Classification Performance in SAS-Based Automatic Mine Countermeasures. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 40, n. 1, p. 57-70, 2015.

MEDINA-CARNICER, R.; CARMONA-POYATO, A.; MUÑOZ-SALINAS, R.; MADRID-CUEVAS, F. J. Determining hysteresis thresholds for edge detection by combining the advantages and disadvantages of thresholding methods. **IEEE transactions on image processing**, v. 19, n. 1, p. 165-173, 2010.

SANT'ANNA, S. J. S.; MASCARENHAS, N. Comparação do desempenho de filtros redutores de "speckle". **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 8, p. 871-877, 1996.

TSO, B.; MATHER, P. **Classification methods for remotely sensed data**. 2. ed. Boca Raton: CRC press, 2009.

YITZHAKY, Y.; PELI, E. A method for objective edge detection evaluation and detector parameter selection. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 25, n. 8, p. 1027-1033, 2003.

CAPÍTULO 4 – IDENTIFICAÇÃO SEMIAUTOMÁTICA DE VÃOS-LIVRES EM DUTOS SUBMARINOS A PARTIR DE DADOS ADQUIRIDOS COM AUV

RESUMO

Levantamentos hidrográficos baseados em sonar de varredura lateral para o mapeamento de dutos submarinos é importante para preservação da integridade das estruturas, evitando eventuais rupturas e outros acidentes ambientais. Levantamento hidrográfico, para este fim, deve ser realizado sistematicamente, em intervalos de tempo determinados por fatores ambientais, tipo de material de construção, vida marinha, tipo de solo, proprietários das estruturas, instruções reguladoras locais, entre outros fatores. O propósito deste trabalho é desenvolver uma rotina para identificar de forma semiautomática a condição de vão livre (se o duto está ou não suspenso em vão-livre) a partir de imagem do Sonar de Abertura Sintética (SAS) e Modelo Digital de Superfície (MDS) provenientes de levantamento hidrográfico com veículo autônomo subaquático (AUV). Apesar do conhecimento prévio da posição e do diâmetro do duto pelo proprietário do mesmo, a identificação automática do diâmetro do duto é vital para determinar se o vão-livre representa ou não risco para o duto. Atualmente a identificação do vão livre é realizada de forma manual em imagens de sonar, com processo lento e susceptível a erro, uma vez que depende da experiência e atenção humana. A metodologia para identificação semiautomática consiste em extrair perfis de seções transversais dos dutos a partir do MDS, e em seguida, obter informações geométricas sobre cada perfil (ex.: Altura, Base e Inclinação) que serão modeladas com base em rede neural e *random forest* para a classificação de condição de vão livre. A rede neural e *random forest* permitem avaliar e modelar a relação entre as variáveis extraídas no perfil para a classificação da condição de vão-livre. Os resultados mostram que a rede neural e *random forest* tiveram resultados similares e satisfatória para a classificação de condição de vão livre com exatidões global de 86,8% e 89,9%, respectivamente.

Palavras-chave: Vão livre, Duto submarino, SAS, AUV, ecobatímetro multifeixe.

ABSTRACT

Hydrographic Surveys for the mapping of underwater pipelines is extremely important for preserving the structure's integrity, avoiding eventual ruptures and other environmental accidents. The hydrographic survey is systematically performed and can be repeated at intervals determined by environmental factors, type of building material, marine life, soil type, structure owners, local regulatory instructions among other factors. The purpose of this work is to develop a automatic routine to semi-automatically classify the pipe's diameter and the free-span condition based on Synthetic Aperture Sonar (SAS) images and Digital Surface Model (DSM) acquired with autonomous underwater vehicles (AUV). Although the pipeline original position is known by the owner of the pipeline, automatic pipeline identification of the pipe's diameter is vital to evaluate if the free-span represents a real threat for the pipeline. Currently the identification of the free span is performed manually on side scan sonar images, a time consuming process susceptible to error, since it depends on the interpreter's experience and attention. The methodology for semi-automatic identification consists of extracting profiles of cross sections of the ducts from the DSM, and then obtaining geometric information about each profile such as height, base and slope that will be modeled based on neural network and random forest for the classification of free span condition. The neural network and random forest tree allowed understanding the relationship between the variables and was determinant for the classification of both the diameter of the pipelines and the free span condition. The results show that the neural network and random forest had similar and satisfactory results for the classification of free span condition with global accuracy of 86.8% and 89.9%, respectively.

Keywords: Free-span, Pipeline, SAS, AUV, echo sounder multibeam.

1 INTRODUÇÃO

Os dutos submarinos transportam petróleo ou gás natural em grandes distâncias ao longo do fundo do mar. O sedimento marinho abaixo da tubulação pode ser deslocado pela dinâmica das correntes oceânicas formando regiões em vão livre, tornando o duto sujeito à ruptura. Portanto, é necessário mapear a ocorrência de vão livres para determinar o tipo de intervenção e prevenção contra acidentes ambientais. Liao et al. (2017) relata que as tecnologias existentes de detecção de extensões de dutos em vão livre incluem principalmente mergulhadores, sonar de varredura lateral, sonar de abertura sintética, ecobatímetro multifeixe, perfilador subfundo e veículos autônomos subaquáticos.

Os veículos autônomos subaquáticos (*Autonomous Underwater Vehicles* - AUV) são dispositivos robóticos que navegam por sistemas de propulsores próprios, controlados e pilotados computacionalmente com possíveis manobras nas três direções, assim permitindo que o veículo siga com precisão a rota pré-programada. (VON ALT, 2003). Segundo Courbot et al. (2013), o AUV foi introduzido com sucesso em levantamentos hidrográficos em operações de petróleo e gás para pesquisas geofísicas e ambientais, substituindo as abordagens tradicionais com embarcações rebocadas.

O levantamento hidrográfico com AUV é realizado por sensores de mapeamento hidrográfico que ficam a bordo do veículo submarino. São diversos os sensores que podem estar a bordo do AUV, entre eles o Sonar de Abertura Sintética (SAS), a câmera fotográfica, filmadora, o perfilador subfundo, o sensor de hidrocarboneto e o ecobatímetro. Segundo Williams et al. (2015) e Zhang et al. (2017), o SAS e o ecobatímetro multifeixes têm sido utilizados com eficácia em inspeção de dutos para fins de transporte de óleo e gás devido à alta resolução desses sensores.

Holland et al. (2016) afirma que a quantidade de informações geradas pelos sensores de levantamento hidrográfico atingiu a era do "*Big Data*". Devido a grande massa, torna-se imprescindível a evolução de processamentos automatizados para garantir maior precisão, rapidez, e, por consequência, a melhor compreensão do ambiente oceânico. Esta evolução inclui o uso de modelos com melhor representatividade, redução de duplicações e padrões de interoperabilidade.

O objetivo desta pesquisa é desenvolver metodologia semi-automática para classificação de condição em vão livre (se o duto está ou não em suspensão), a partir de imagens de Sonar de Abertura Sintética e Modelos Digital de Superfície (MDS)

provenientes do levantamento hidrográfico com AUV através de inteligência computacional (rede neural e *random forest*).

2 LEVANTAMENTO HIDROGRÁFICO COM AUV

O levantamento hidrográfico utilizado neste trabalho foi realizado na região da Bacia de Campos no estado do Rio de Janeiro - Brasil, e disponibilizado pela PETROBRÁS S.A. A base de dados foi obtida com sensores SAS, Ecobatímetro multifeixes com o objetivo de mapear as estruturas submarinas associadas ao transporte de óleo e gás. O levantamento hidrográfico com AUV realizado para a composição da base de dados utilizada no presente estudo consistiu na aquisição de dados em dois momentos distintos (Figura 1).

- O primeiro momento foi realizado um levantamento em larga escala com o sensor do SAS para determinar a posição das estruturas e possíveis eventos em torno das estruturas;
- O segundo momento consistiu em levantamento detalhado com ecobatímetro multifeixes, sensor de hidrocarboneto e câmera fotográfica de alta definição.

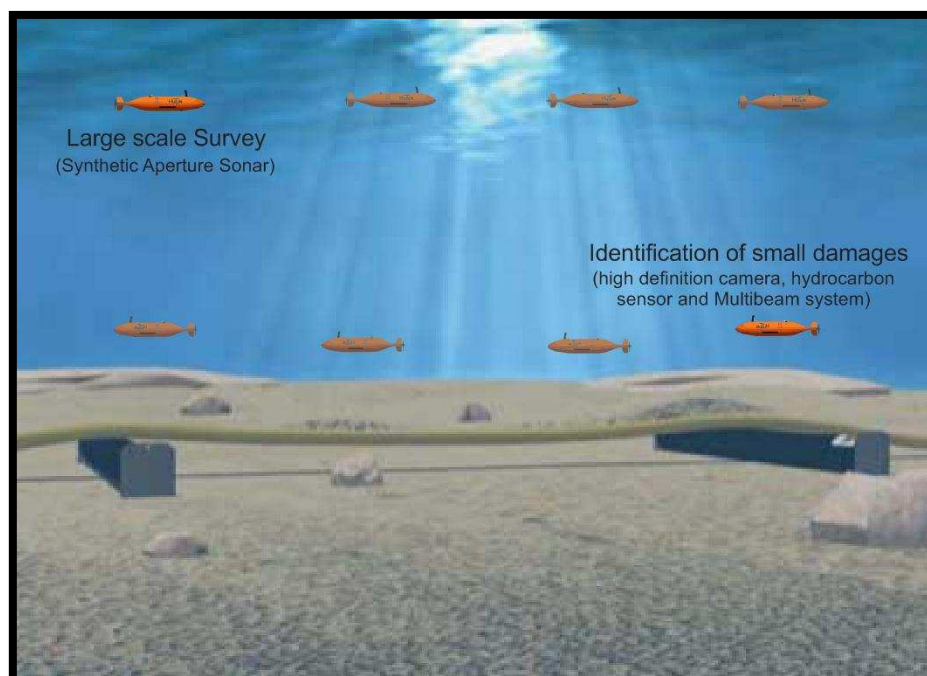


Figura 1 – Ilustração de levantamento hidrográfico com AUV
Fonte: Fernandes et al. (2015)

As amostras das seções transversais no treinamento, avaliação e aplicação da Rede Neurais Artificiais (ARN) e do *Random Forest* na classificação de trechos em condição de vão livre foram obtidas a partir de 5 (cinco) pares de cenas contendo a imagem do Sonar de abertura Sintética (SAS) e o Modelo Digital de Superfície (MDS). As amostras das seções transversais foram obtidas de gasodutos, oleodutos e aquedutos com diâmetros de 8, 12, 16 e 24 polegadas.

As imagens do SAS foram obtidas no levantamento hidrográfico supracitado pelo sonar HISAS 1030 da *Kongsberg Maritime AS* com as seguintes características: frequência de 50Hz a 120Hz, resolução espacial de 4x4 cm, níveis de cinza (0-255). A Figura 2 representa um trecho da imagem do SAS com dutos de 12 e 16 polegadas e um trecho em vão livre.

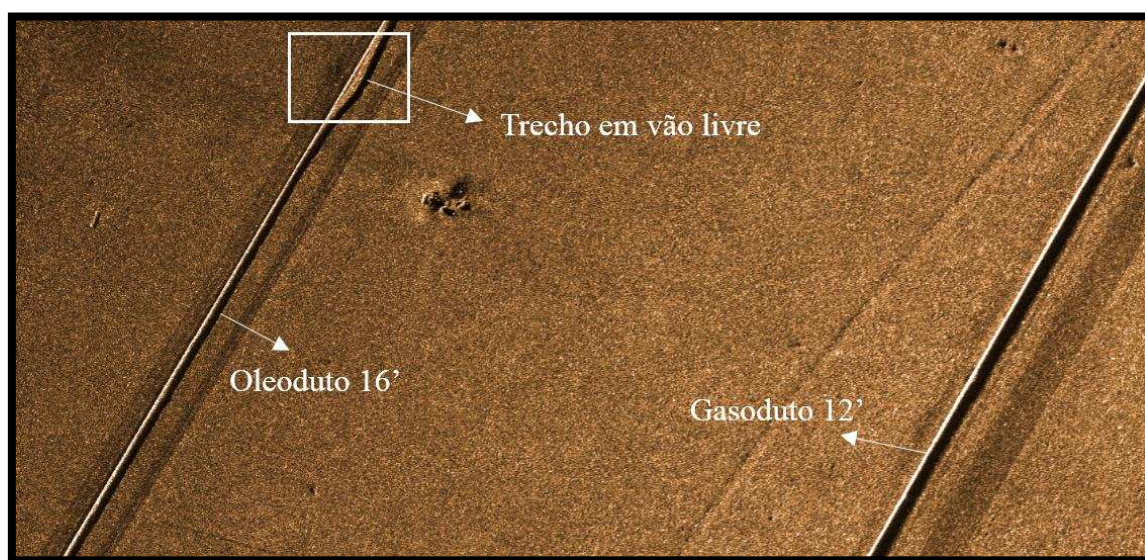


Figura 2 – Trecho da imagem do SAS com dutos e trecho em vão livre.

O MDS do fundo marinho foi gerado a partir do levantamento hidrográfico com Ecobatímetro Multifeixe EM 2040 instalado a bordo do AUV, cujo modelo possui resolução espacial de 20 cm e precisão vertical de 5 cm. A Figura 3 ilustra a representação tridimensional (3D) do fundo marinho e do oleoduto de 16 polegadas da Figura 2. O modelo digital de superfície do levantamento hidrográfico desse estudo caracteriza o fundo marinho e as estruturas submarinas associadas no transporte de óleo e gás, porém os dutos são as estruturas submarinas de interesse.

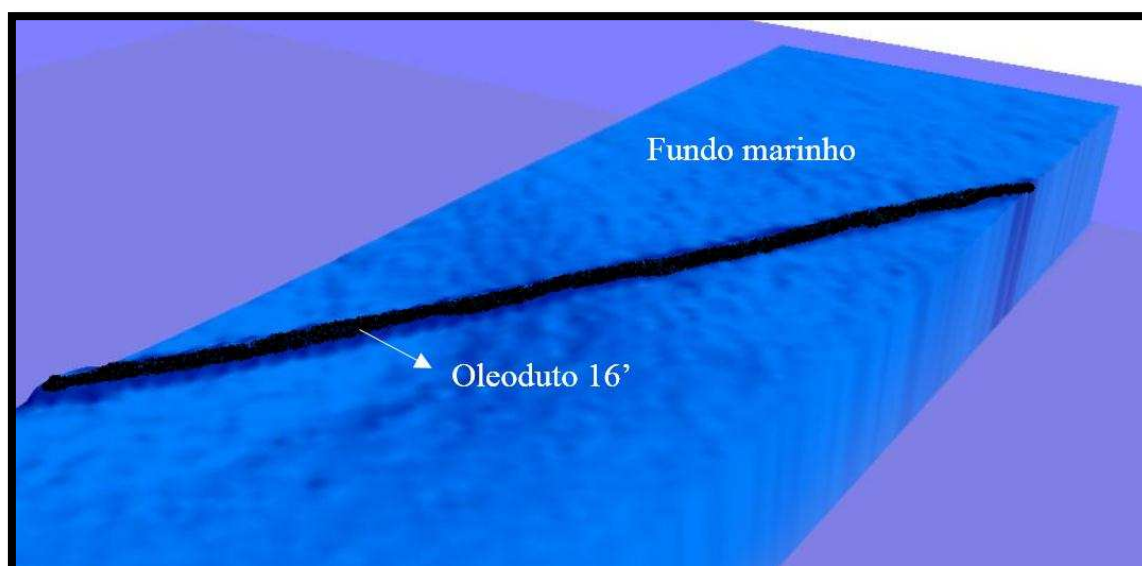


Figura 3 – MDS de um trecho da Figura 2 com representação 3D doo fundo marinho e do oleoduto.

3 CLASSIFICAÇÃO DE CONDIÇÃO DE VÃO LIVRE

A metodologia proposta para a classificação de condição de vão livre segue o esquema da Figura 4.

- A fase inicial “Posição do duto” georreferência o MDS a partir da imagem do SAS, onde serão determinadas as posições dos dutos de forma manual.
- A fase “Seções transversais” extraem-se os pontos notáveis e calculam-se os elementos geométricos da curva.
- A fase “Análise das seções” classifica-se as condições de vão livre, com base nos elementos da curva e no diâmetro do duto, empregando métodos de aprendizagem de máquina.

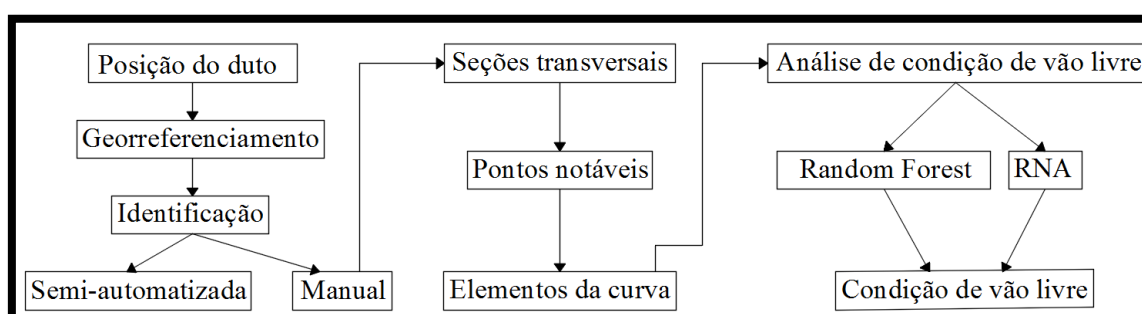


Figura 4 – Fluxograma para classificação de condição de vão livre.

3.1 Duto

A determinação da posição do duto é a parte inicial para realizar a classificação da condição de vão livre. A identificação dos dutos pode ser realizada de forma manual, onde o interprete identifica as feições através de análise visual e as representa por vetorização manual, ou de forma semi-automatizada, por meio da aplicação de técnicas de processamento digital de imagem (Dura et al., 2002; Lopera e Dupont, 2012; Fandos, 2014; Leier et al., 2015). Nesse estudo, utilizou-se foi de forma manual.

Antes da identificação dos dutos na imagem do SAS, torna-se necessário fazer o georreferenciamento entre do MDS a partir da imagem do SAS, pois os dados foram adquiridos em diferentes momentos e podem estar deslocados espacialmente. A Figura 5(a) apresenta uma imagem do SAS onde os dutos estão representados por linhas vermelha. Já as figuras 5(b) e 5(c) ilustram o posicionamento do duto sobre o MDS sem e com a correção espacial respectivamente.

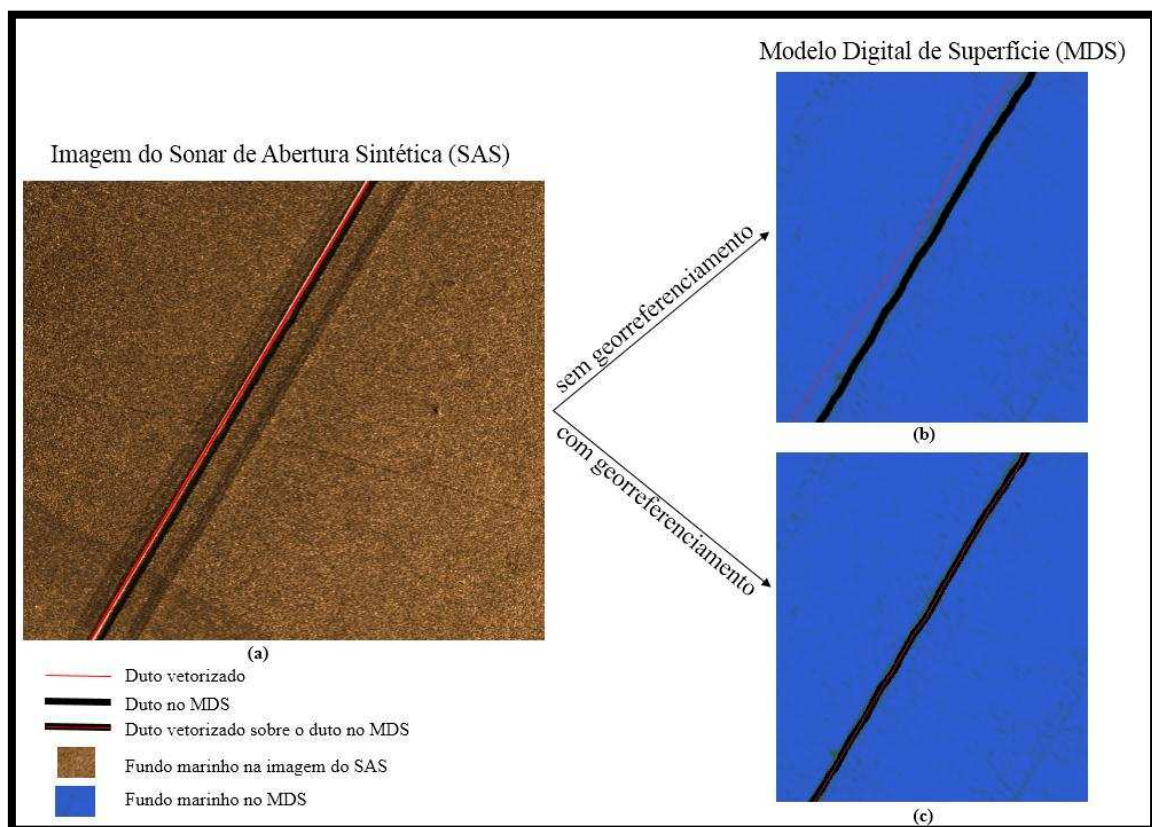


Figura 5 – Georreferenciamento da imagem do SAS com MDS.

3.2 Seções transversais

A posição horizontal das seções transversais foi obtida pela projeção perpendicularmente ao eixo do duto (vetores), obtidos nas imagens do SAS, com espaçamento de 1 metro e comprimento de 3 metros, sendo 1,5 metro para cada lado. No entanto, a posição vertical (altitudes) do fundo marinho e dos dutos das seções transversais foram determinadas pelo MDS.

Os pontos notáveis foram extraídos das seções transversais e são representados pelos pontos “G”, “A” e “B” ilustrados na Figura 6. O ponto “G” representa a geratriz superior do duto, e os pontos “A” e “B” representam a interseção do duto no solo, ou sua projeção quando está em elevação. A partir dos pontos notáveis são calculados os elementos da curva (Altura, Base e Inclinação), Figura 6.

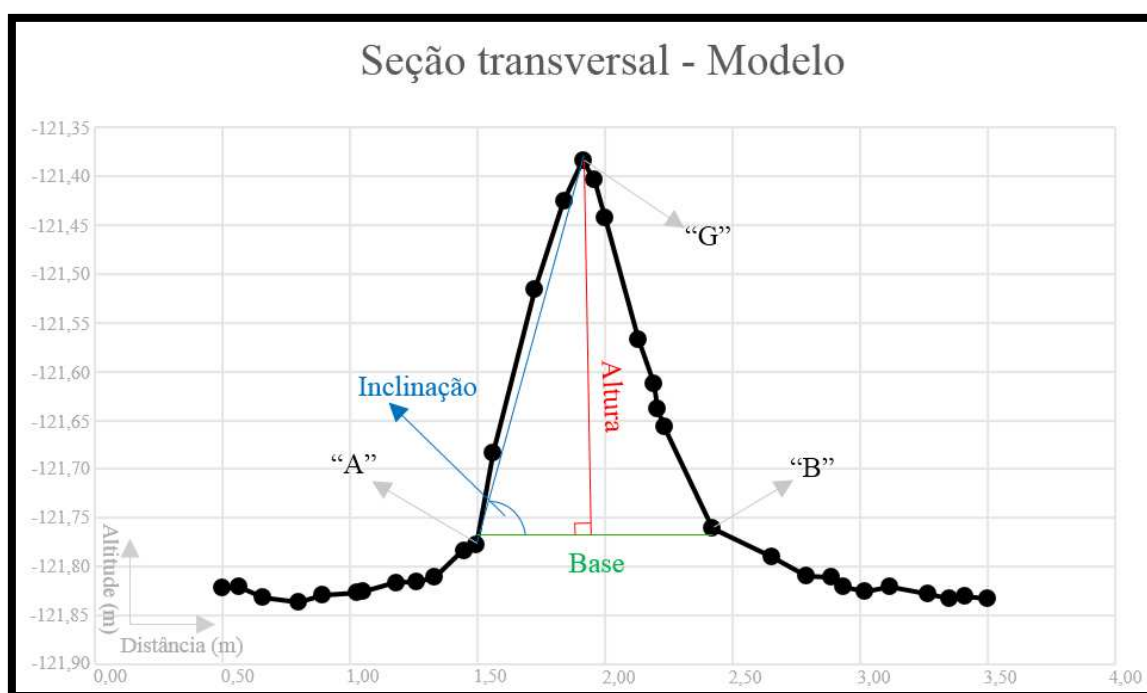


Figura 6 – Sistema de coordenadas, seção transversal, pontos notáveis e os elementos da curva.

A partir das coordenadas (relativas à altitude e distância) dos pontos notáveis adquiridas nas seções transversais, são calculados os seguintes elementos: Base (Eq. 1), Altura (Eq. 2) e Inclinação (Eq. 3).

$$Base = D_B - D_A. \quad (1)$$

$$Altura = A_G - (A_A + A_B)/2. \quad (2)$$

$$Inclinação = \text{atan}\left(2 \cdot \frac{Altura}{Base}\right). \quad (3)$$

Onde:

$D_B - D_A$ = Distâncias horizontais dos pontos notáveis “A” e “B” até a origem do sistema de coordenadas;

A_A, A_B e A_G = Altitude dos pontos notáveis “A”, “B” e “G”.

3.3 Análises de condição de vão livre

Os modelos computacionais rede neural artificial e *random forest* foram utilizados para a classificação da condição de vão livre com informações obtidas da imagem do SAS e do MDS. As seguintes informações foram utilizadas para treinamento e avaliação desses modelos computacionais:

- *Elementos da curva (Base, Altura e Inclinação)*: calculados a partir dos pontos notáveis de 302 seções transversais;
- *O diâmetro do duto*: extraído das informações descritivas constantes na base cartográfica disponibilizada pela Petrobrás S.A.;
- *Vão livre*: Liu e Song (2006) apresentam o método de classificação visual da condição vão e o cálculo para estimar a altura do vão livre (h). A classificação da condição de vão livre a partir análise visual da imagem do SAS é pela observação o deslocamento da sombra em relação ao duto. Dessa forma, o vão livre é caracterizado pela organização da resposta acústica em relação aos alvos: Fundo-Duto-Fundo-Sombra-Fundo ou Fundo-Sombra-Fundo-Duto-Fundo (Figura 7).

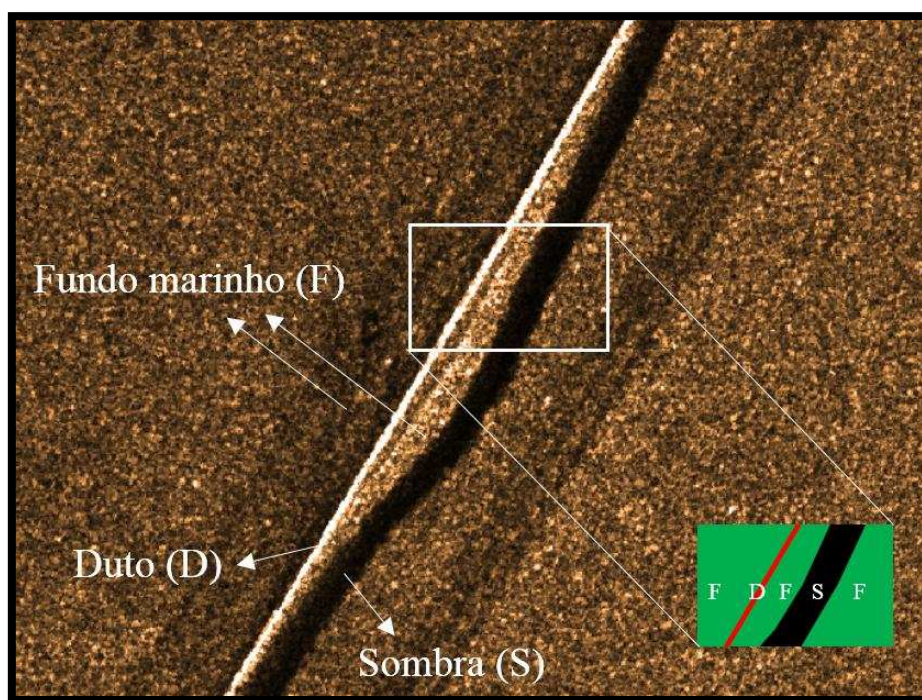


Figura 7 – Caracterização do vão livre na imagem do SAS.

3.3.1 *Random forest* ou floresta aleatória

Random forest ou floresta aleatória baseia-se na utilização de múltiplas árvores de decisão para a classificação de uma classe de interesse. Árvore de decisão, segundo Han et al. (2012), é uma estrutura de árvore semelhante a um fluxograma, em que cada nó denota um teste em um valor de atributo, cada ramo representa um resultado do teste e as folhas da árvore representam classes ou distribuições de classe. Árvores de decisão podem ser facilmente convertidas em regras de classificação.

Segundo Breiman (2001) e Han et al. (2011), a *random forest* é um classificador que consiste em uma coleção de classificadores estruturados em árvore de decisão $\{h(X, \Theta_k), k = 1, \dots\}$, onde $\{k\}$ são vetores aleatórios amostrados de forma independentes e distribuídos identicamente. O resultado da classificação utiliza o método *ensemble*, que consiste na eleição da classe X pelo voto majoritário dentre todas as árvores de decisão utilizadas (DIETTERICH, 2000). *random florest* utiliza a técnica *bootstrap* para selecionar de forma aleatória os dados de entrada. Segundo Efron (1992) O procedimento *bootstrap* é uma técnica de reamostragem, onde a partir do conjunto de treinamento, são selecionados aleatoriamente exemplos para a obtenção de um “novo” conjunto de dados.

A *random forest* permite que se obtenha modelos muito eficazes sem nenhuma preparação de dados ou conhecimento de modelagem Breiman e Cutler (2014). Dessa

forma, essa técnica tem sido utilizada para diversos tipos de classificação com dados oriundos de levantamento hidrográfico, como: Mapeamento de Habitat Bentônico (HASAN et al., 2014), Classificação de substrato do leito marinho (DANGERFIELD et al., 2016), Classificação de ruídos do fundo do mar (LAWSON et al., 2017) e Mapeamento de habitat em águas marinhas rasas (IERODIACONOU et al., 2018).

O treinamento e avaliação do modelo computacional derivado da *random forest* para a classificação de vão livre foi realizado pelo pacote “randomForest” do programa R, e teve 302 amostras de seções transversais onde 80% foram para treinamento e 20% para avaliação. Utilizou-se como informações de entrada os elementos da curva (Altura, Base e Inclinação) e o diâmetro do duto.

3.3.2 Redes neurais

As redes neurais buscam por meio de aprendizagem computacional e reconhecimento de padrões aproximar o processamento dos computadores ao cérebro humano. Tagliarini et al. (1991) afirma que as buscas por esses modelos computacionais levaram pesquisadores a estudar sistemas neurais biológicos na tentativa de projetar sistemas computacionais com capacidades semelhantes ao cérebro, fornecendo o modelo computacional necessário para programar e coordenar o comportamento de milhares de elementos de processamento. Bishop (1995) e Morais (2010) relatam que modelo McCulloch e Pitts (MCP) proposto por (MCCULLOCH e PITTS, 1943) é uma simplificação do que se sabia até então a respeito do neurônio, como um modelo matemático simples para o comportamento de um único neurônio em um sistema nervoso biológico. A partir desse modelo foram derivados vários outros modelos de aprendizagem.

Segundo Anastasiadis et al. (2005), diferentes algoritmos foram propostos no aprendizado de redes neurais. Métodos como os gradientes conjugados (MØLLER, 1993), o algoritmo Levenberg-Marquardt (HAGAN e MENHAJ, 1994) e o algoritmo Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (GILL et al., 1981) são considerados opções populares para o treinamento de redes neurais *feedforward*. Em (STATECZNY e WLODARCZYK-SIELICKA, 2014) foi utilizada e examinada rede neural artificial com um processo alternativo de redução de dados de levantamento hidrográficos, sonar de abertura sintética e ecobatímetro multifeixe, para a produção de mapas de digitais de navegação.

O método *backpropagation* é amplamente utilizado no treinamento de redes neurais artificiais do tipo *Perceptron* Multicamada (MLP – MultiLayer Perceptron), Khadse et al. (2015). Segundo Schmidhuber (2015), a Rede Neural Artificial (RNA) consiste em muitos processadores simples, conectados, chamados neurônios, cada um produzindo uma sequência de ativações de valor real. Os neurônios da camada de entrada são ativados através de sensores que percebem o meio ambiente, outros neurônios das camadas intermediária são ativados através de conexões ponderadas de neurônios para desencadear ações pela camada de saída.

A rede neural artificial foi treinada e avaliada pelo pacote “neuralnet” do programa R que utiliza o método *backpropagation* no aprendizado computacional. Foram utilizadas 302 amostras onde 80% foram para o treinamento e 20% para avaliação da rede neural artificial. A arquitetura da RNA utilizada teve como camada de entrada os elementos da curva (Altura, Base e Inclinação), uma camada intermediária e duas camadas de saída (se o duto está ou não está em vão livre), (Figura 8). Essa arquitetura da RNA apresentou melhores resultados na avaliação da condição de vão livre.

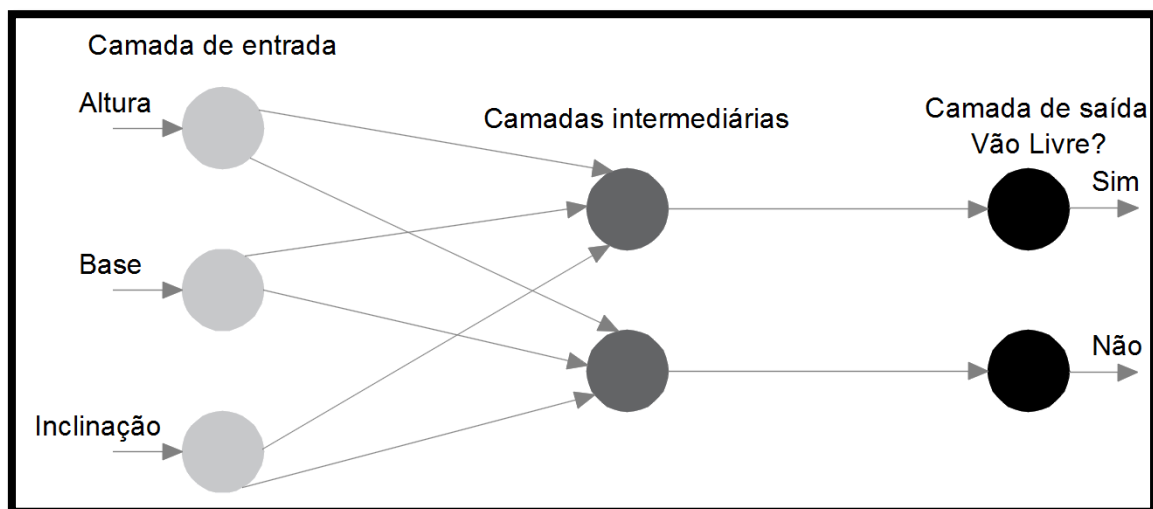


Figura 8 – Rede neural artificial para a classificação de condição de vão livre.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foram utilizadas 209 amostras de seções transversais para treinar e avaliar a condição de vão livre por rede neural artificial e *random forest* que tiveram exatidão global de 92,1% e 95,9% respectivamente. Com a liberação de outra área contendo outra imagem de SAS e MDS foi possível gerar mais 93 amostras, assim os

resultados foram a partir de 302 amostras de seções transversais que tiveram exatidão global de 86,8% e 89,9% respectivamente. Essa piora na exatidão global em relação ao primeiro treinamento e avaliação foi devido a qualidade do MDS que estava mais ruidoso. Logo então, a qualidade do levantamento batimétrico para a determinação do MDS é importante na caracterização do fundo marinho e do duto, esse levantamento deve ter resolução compatível com o tamanho do alvo de interesse.

Apesar da *random forest* ter uma melhor performance, não pode-se afirmar que essa técnica é melhor que a rede neural, pois a qualidade das informações obtidas MDS irá influenciar diretamente no treinamento das técnicas de classificação utilizada, e assim alterar os resultados na classificação da condição de vão livre.

A partir dos modelos computacionais, treinados e avaliados para classificação de condição de vão livre provenientes da rede neural artificial e *random forest*, classificou-se a condição de vão livre de uma área, denominada de “Teste”, contendo 45 seções transversais, espaçadas em 1 metro, sobre duto com diâmetro de 16 polegadas. A Figura 9 ilustra a espacialização das seções sobre imagem do SAS e os resultados da classificação pelo método da rede neural. Os resultados mostraram que a classificação semiautomática de ocorrência de vão livre pelo método de rede neural artificial foi similar ao método de *random forest*, pois apenas duas seções (a de nº 3 e nº 20) entre as 45 analisadas apresentou divergência entre as classificações. Os resultados também mostram que métodos de classificação utilizados foram coerentes quando comparados com a classificação visual na imagem do SAS, também vale ressaltar, que a determinação com precisão do início e fim do trecho em vão livre não é simples devido a resolução espacial da imagem de SAS e do MDS.

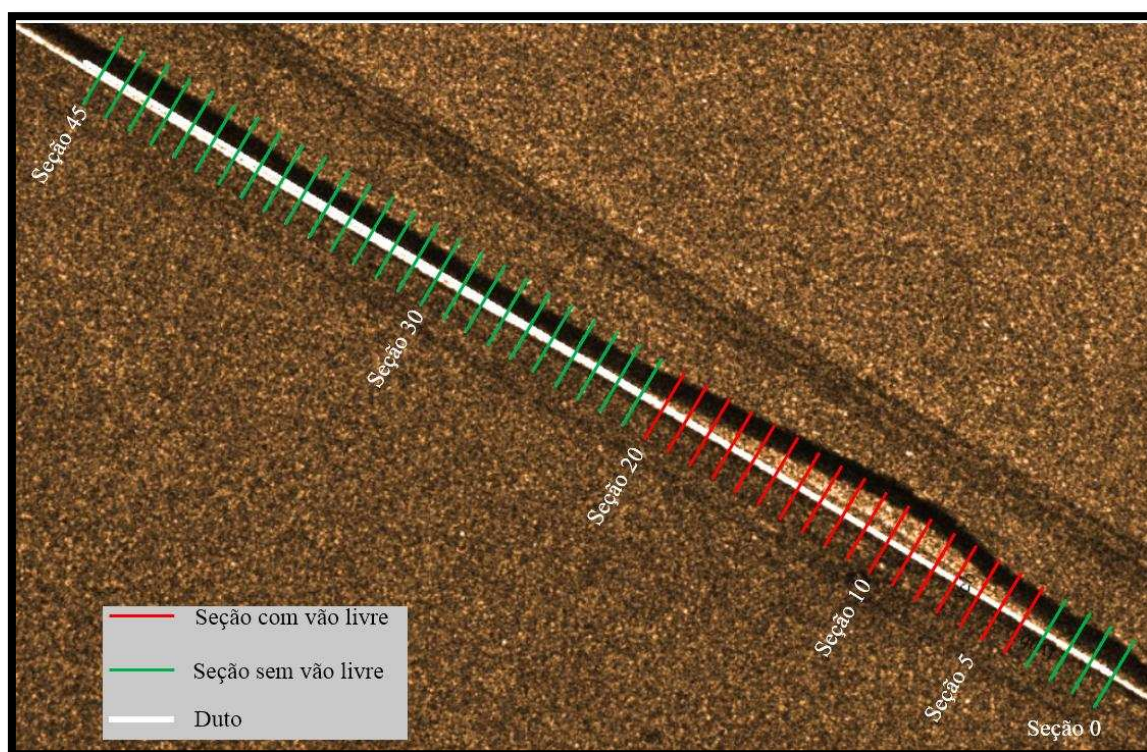


Figura 9 – Simulação de condição de vão livre.

Os modelos computacionais classificam os trechos e vão livre, porém as informações relevantes para a tomada de decisão na intervenção a ser realizada nos dutos são referentes ao tamanho do vão livre. Dessa forma, a Figura 10 apresenta os perfis longitudinais da geratriz superior do duto, determinada pelo ponto de maior elevação da seção; da geratriz inferior, calculada subtraindo da altitude da geratriz superior o diâmetro do duto e do fundo marinho, calculado pela média das altitudes dos pontos notáveis “A” e “B”. Pode-se observar que o trecho em vão livre inicia na seção transversal de nº 4 e termina na seção nº 20, ou seja, tem uma base de 16 m e maior altura (0,54 m), na seção 9, valor calculado pela diferença entre a altitude da geratriz inferior e a altitude do fundo marinho, no ponto em que o fundo marinho tem menor altitude. A partir da seção de nº 20 o duto aparentemente apresenta-se enterrado, porém devido a resolução espacial e incerteza do MDS dessa pesquisa, essa afirmação não pode ser totalmente considerada.

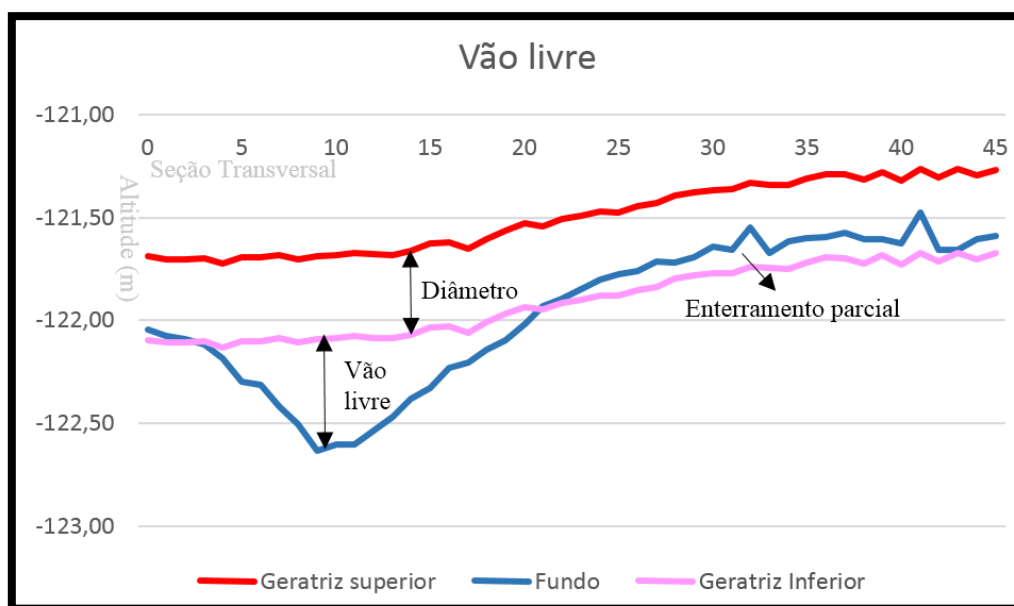


Figura 10 – Perfil longitudinal para a visualização de vão livre.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conclui-se que é possível estimar a condição de vão livre de forma semiautomática com modelos computacionais a partir de informações, do levantamento hidrográfico com AUV, da posição do duto mapeado com a imagem do SAS, elementos do duto (Base, Inclinação e Altura) obtidas do MDS e do diâmetro do duto informada pelo proprietário do mesmo.

Os resultados com nível de quase 90% de exatidão global pelos métodos de inteligência computacional (rede neural artificial e *random forest*) apresentaram grande potencial, visto que de modo geral, a análise é referente as seções transversais, ou seja, análises pontuais, enquanto o esperado é o mapeamento do trecho em vão livre. Esses erros ocorridos na classificação das seções transversais são devidos a ruídos referente ao MDS e também a incerteza na determinação do início e fim do trecho em vão livre.

Recomendações para trabalhos futuros: Realizar treinamento da rede neural e *random forest* com informações de dutos de diâmetros diferentes, automatizar todo o processo de classificação e analisar o esforço computacional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Petrobrás S.A. e aos seus engenheiros André Luiz Neves de Souza e Marksuel Xavier Bastos por incentivarem e fornecerem as imagens de SAS dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANASTASIADIS, A. D.; MAGOULAS, G. D.; VRAHATIS, M. N. New globally convergent training scheme based on the resilient propagation algorithm. **Neurocomputing**, v. 64, p. 253-270, 2005.
- BREIMAN, L.. **Random forests**. Machine learning, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001.
- BREIMAN, L.; CUTLER, A. An introduction to random forest for beginners. 1. ed. Califórnia, Estados Unidos: **Salford Systems**, 2014. 71 p. 24, 26, 27.
- BISHOP, C. M. **Neural networks for pattern recognition**. Oxford university press, 1995.
- CARVALHO, D. R.. **Árvore de decisão/algoritmo genético para tratar o problema de pequenos disjuntos em classificação de dados**. Tese - Programa de Engenharia civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- COURBOT, A.; NASR, A.; GILMOUR, W.; BIEDERMANN, C. A new approach to pipeline inspection using autonomous underwater vehicles. **Offshore technology conference**. Offshore Technology Conference, 2013.
- DANGERFIELD, N.; LACKO, L.; OLIPHANT, E.; BOSMA, C., SEYMOUR, B. Seabed Substrate Classification Charts for Vancouver Harbour and Vicinity. **Salish Sea Ecosystem Conference**, 2016.
- DIETTERICH, T. G. Ensemble methods in machine learning. **In: International workshop on multiple classifier systems**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2000. p. 1-15.
- DURA, E.; BELL, J. M.; LANE, D. M. Superellipse fitting for the classification of mine-like shapes in side-scan sonar images. In: **OCEANS'02 MTS/IEEE**. IEEE, p.23-28, 2002.
- EFRON, B. Bootstrap methods: another look at the jackknife. In: **Breakthroughs in statistics**. Springer, New York, NY, 1992. p. 569-593.
- FANDOS, R.; ZOUBIR, A. M.; SIANTIDIS, K. Unified design of a feature-based ADAC system for mine hunting using synthetic aperture sonar. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 52, n. 5, p. 2413-2426, 2014.
- FERNANDES, V. H.; NETO, A. A.; RODRIGUES, D. D. Pipeline inspection with AUV. In: **Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics)**, 2015 IEEE/OES. IEEE, 2015. p. 1-5.
- GILL, P. E.; MURRAY, W.; WRIGHT, M. H. **Practical optimization**. Academic Press, New York, 1981.
- HAGAN, M. T.; MENHAJ, M. Training feedforward networks with the Marquardt algorithm. **IEEE transactions on Neural Networks**, v. 5, n. 6, p. 989-993, 1994.

HAN, J.; PEI, J.; KAMBER, M. **Data mining: concepts and techniques**. Elsevier, 2012.

HASAN, R. C.; IERODIACONOU, D.; LAURENSEN, L.; SCHIMEL, A. Integrating multibeam backscatter angular response, mosaic and bathymetry data for benthic habitat mapping. **Plos one**, 9(5), e97339, 2014.

HOLLAND, M.; HOGGARTH, A.; NICHOLSON, J. Hydrographic processing considerations in the “Big Data” age: An overview of technology trends in ocean and coastal surveys. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, p. 012016, 2016.

IERODIACONOU, D.; SCHIMEL, A. C.; KENNEDY, D.; MONK, J.; GAYLARD, G.; YOUNG, M.; DIESING, M.; RATTRAY, A. Combining pixel and object based image analysis of ultra-high resolution multibeam bathymetry and backscatter for habitat mapping in shallow marine waters. **Marine Geophysical Research**, p. 1-18, 2018.

LAWSON, E.; SMITH, D.; SOFGE, D.; ELMORE, P.; PETRY, F. Decision forests for machine learning classification of large, noisy seafloor feature sets. **Computers & Geosciences**, 99, p. 116-124, 2017.

LEIER, S.; FANDOS, R.; ZOUBIR, A. M. Motion Error Influence on Segmentation and Classification Performance in SAS-Based Automatic Mine Countermeasures. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 40, n. 1, p. 57-70, 2015.

LIAO, N.; DING, Q.; ZHANG, H.; DU, S.; ZHANG, S.; e Tang, B. A Method for Identifying Free Span of Subsea Pipelines. **The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference**. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2017.

LIU, P.; SONG, G. Undersea Pipeline Span Investigation. **Sea Technology**, Vol. 47(7), 41-44, 2006

LOPERA, O.; DUPONT, Y. Automated target recognition with SAS: Shadow and highlight-based classification. In: **Oceans, 2012**. IEEE, 2012. p. 1-5.

KHADSE, C. B.; CHAUDHARI, M. A.; BORGHATE, V. B. Conjugate gradient back-propagation based artificial neural network for real time power quality assessment. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 82, p. 197-206, 2016.

MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **The bulletin of mathematical biophysics**, v. 5, n. 4, p. 115-133, 1943.

MØLLER, M. F. A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning. **Neural networks**, v. 6, n. 4, p. 525-533, 1993.

MORAIS, E. C. **Reconhecimento de padrões e redes neurais artificiais em predição de estruturas secundárias de proteínas**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

RIEDMILLER M. *Rprop - Description and Implementation Details*. **Technical Report**. University of Karlsruhe, 1994.

RIEDMILLER M.; BRAUN H. A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The RPROP algorithm. **Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN)**, pages 586-591. San Francisco, 1993.

SCHMIDHUBER, J. Deep learning in neural networks: An overview. **Neural networks**, v. 61, p. 85-117, 2015.

STATECZNY, A.; WLODARCZYK-SIELICKA, M. Self-organizing artificial neural networks into hydrographic big data reduction process. In: International Conference on Rough Sets and Intelligent Systems Paradigms. Springer, Cham, p.335-342.

TAGLIARINI, G. A.; CHRIST, J. F.; PAGE, E. W. Optimization using neural networks. **IEEE transactions on computers**, v. 40, n. 12, p. 1347-1358, 1991.

VON ALT, C. **Autonomous underwater vehicles**. Autonomous Underwater Lagrangian Platforms and Sensors Workshop, v. 3, 2003.

ZHANG, W.; ZHOU, T.; PENG, D.; Shen, J. Underwater pipeline leakage detection via multibeam sonar imagery. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 141(5), 3917-3917, 2017.

WILLIAMS, David P.; HUNTER, Alan J. On the relationship between SAS image resolution and target-detection performance. **OCEANS 2015-Genova**. IEEE, 2015. p. 1-5.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES GERAIS

Conclui-se que os objetivos da pesquisa aplicada foram alcançados, tendo em vista que os resultados do presente estudo mostraram que a utilização do AUV com SAS e ecobatímetro em mapeamento de estruturas submarinas associadas a óleo e gás tem grande potencial, devido à qualidade posicional aceitável e à possibilidade efetiva de automação da redução do ruído *speckle*, e em mapeamento de dutos e identificação de vão livre de forma semi-automática.

O modelo da determinação das coordenadas geodésicas do levantamento hidrográfico com AUV foi simulado e testado com sucesso em ambiente tridimensional de CAD. Dessa forma, verificou-se que a incerteza posicional está relacionada diretamente à qualidade e às especificações dos sensores e equipamentos presentes na determinação das coordenadas geodésicas no levantamento hidrográfico, com a correta configuração dos sensores e equipamento o levantamento hidrográfico com AUV atende assim às especificações de incerteza das coordenadas horizontais de todas as ordens da IHO (2010). Sendo que a fase crítica do levantamento hidrográfico é o posicionamento acústico pelo método USBL.

Os ruídos *speckle* tiveram redução significativa de 14,4% e 6,9%, e ganho discreto de 0,2% e 1,2% para cada imagem, respectivamente, no realce das feições lineares referentes as áreas de estudo. Os resultados mostraram que o uso de funções de realce de imagens é uma poderosa ferramenta na redução dos ruídos *speckle* e melhora na definição dos objetos de interesse em imagens SAS, permitindo assim, processamentos semiautomatizados mais rápidos e eficazes de extração de feições.

O mapeamento de dutos de forma semi-automática é possível aplicando-se técnicas de PDI. Os resultados mostraram que mais de 80% dos dutos foram mapeados com êxito, essa porcentagem é bem relevante, tendo em vista o grande volume de dados para as aplicações das imagens SAS no mapeamento marítimo, o que seria moroso com uso de uma abordagem manual. Evidenciou-se que a etapa de pré-processamento realçou as feições de interesse e reduziu os ruídos, a etapa de extração de feições caracterizou o fundo marinho e os dutos submarinos, e a etapa de pós-processamento apresentou ótimo desempenho na conexão das feições lineares.

A metodologia proposta para identificação de vão livre demonstrou-se eficaz na classificação semi-automática a partir da posição do duto extraída da imagem do sonar de

abertura sintética e dos perfis obtidos do modelo digital de superfície do ecobatímetro multifeixes oriundos do levantamento hidrográfico com AUV. Os resultados mostram que independentemente do modelo de predição utilizado (redes neurais artificiais ou *random forest*) a exatidão global foi superior à 85%.

A utilização do AUV para levantamentos hidrográficos de estruturas associadas a óleo e gás mostrou-se uma ótima opção para a indústria petrolífera em questão de incerteza posicional e do desafio associado ao mapeamento semiautomatizado do fundo submarino. Assim recomenda-se investimento em aperfeiçoamento de métodos e técnicas associadas às pesquisas na melhoria da incerteza posicional e incentivo na automatização do processamento dos dados hidrográficos.