



**Alan Porto Bontempo**

**Uma Abordagem Híbrida para Localização e  
Mapeamento Simultâneos para Robôs Móveis com  
Sonares Através de Filtro de Kalman Estendido**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadoras: Prof<sup>a</sup>. Marley Maria Bernardes Rebuszi Vellasco  
Prof<sup>a</sup>. Karla Tereza Figueiredo Leite

Rio de Janeiro  
Abril de 2012



**Alan Porto Bontempo**

**Uma Abordagem Híbrida para Localização e Mapeamento Simultâneos para Robôs Móveis com Sonares Através de Filtro de Kalman Estendido**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof<sup>a</sup>. Marley Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco**

Orientadora

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Karla Tereza Figueiredo Leite**

Co-orientadora

Centro Setorial de Computação e Matemática – UEZO

**Prof. Ricardo Tanscheit**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Prof. Paulo Fernando Ferreira Rosa**

Sistemas e Computação – IME

**Prof. José Franco do Amaral**

Departamento de Engenharia Eletrônica e Telecomunicações – UERJ

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de Abril de 2012

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Alan Porto Bontempo**

Graduou-se em Engenharia Elétrica na UFMA (Universidade Federal do Maranhão) em 2008. Participou de diversos congressos na área de Engenharia Elétrica e Robótica.

### Ficha Catalográfica

Bontempo, Alan Porto

Uma abordagem híbrida para localização e mapeamento simultâneos para robôs móveis com sonares através de filtro de Kalman estendido / Alan Porto Bontempo ; orientadoras: Marley Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco, Karla Tereza Figueiredo Leite. – 2012.

120 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Robótica móvel. 3. SLAM. 4. Sonar. 5. Filtro de Kalman estendido. I. Vellasco, Marley Maria Bernardes Rebuzzi. II. Leite, Karla Tereza Figueiredo. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

A meus pais,  
José Bontempo de Oliveira & Raimunda Porto Bontempo

## Agradecimentos

A Deus pelo dom da vida.

Às minhas orientadoras, Professora Marley Vellasco e Karla Figueiredo, pela orientação, paciência e companheirismo na execução deste trabalho.

Ao CNPq, Faperj e a PUC-Rio pelo financiamento da pesquisa e aos auxílios concedidos sem os quais essa pesquisa seria inviável.

Aos meus pais, por todo o amor e apoio.

A minha noiva, Kelly Marque de Sousa, pela imensa paciência e amor.

A Antônio Nazaro e Maria dos Remédios, pela grande amizade e por me acolherem quando mais precisei.

A minha família, que mesmo distante e espalhada, foi fonte de estímulo e companheirismo em todos os momentos, em especial minhas avós, Zélia Bontempo e Francisca Porto, meus irmãos, Leonam, Karina e Luciano, e meus sobrinhos, Lara, Laís, Eva e Levi, por me proporcionarem momentos inesquecíveis.

Aos amigos do ICA, em especial Iuri Steiner, Reinaldo Bellini, Roberto Miyoshi e Oldemar Júnior, pela ajuda e companheirismo de todas as horas.

Ao amigo e parceiro Rodrigo Vieira, que prestou uma inestimável ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

A meus amigos contrerrâneos: Márcio, Diego, Francisco, Hubaldo e Raphael, a minhas amigas e sempre vizinhas: Tia Luzia, Natália e Luciana, e aos amigos da UFMA: Enio Aguiar, Sérgio Trovão e Lúcio Dias.

A todos os professores e funcionários da PUC-Rio que contribuíram de forma direta ou indireta para este trabalho.

## Resumo

Bontempo, Alan Porto; Vellasco, Marley Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco (Orientadora); Leite, Karla Tereza Figueiredo (Co-orientadora). **Uma Abordagem Híbrida para Localização e Mapeamento Simultâneos para Robôs Móveis com Sonares Através de Filtro de Kalman Estendido**. Rio de Janeiro, 2012. 120p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho aborda o problema da Localização e Mapeamento Simultâneos em ambientes estruturados, utilizando um robô móvel equipado com sonares, bússola eletrônica e *encoders*. Na modelagem sugerida há a construção do mapa do ambiente e a localização do robô de forma interativa. O método proposto, denominado de LMS-H (Localização e Mapeamento Simultâneos - Híbrido), faz uso de duas formas de representação do ambiente: Mapa de Ocupação em Grade e Representação Contínua. O Mapa de Ocupação em Grade divide o ambiente em pequenas partes iguais, classificando-as em ocupadas ou vazias. A Representação Contínua utiliza retas para representar os planos detectados no ambiente, formando um mapa em duas dimensões e cada reta do mapa é considerada um marco. Sempre que um plano é novamente detectado pelo robô a reta correspondente a ele é recalculada com os novos pontos obtidos e a posição do robô é atualizada via Filtro de Kalman Estendido. A eficácia do método foi comprovada através de seis estudos de caso: três em ambientes virtuais e três em ambientes reais. Os estudos de casos em ambientes reais foram realizados utilizando-se um protótipo feito sob a plataforma LEGO Mindstorms. Os resultados obtidos comprovaram a eficácia do método proposto.

## Palavras-chave

Robótica Móvel; SLAM; Sonar; Filtro de Kalman Estendido;

## Abstract

Bontempo, Alan Porto; Vellasco, Marley Maria Bernardes Rebuzzi (Advisor); Leite, Karla Tereza Figueiredo (Co-Advisor). **A Hybrid Approach for Simultaneous Localization and Mapping With Sonar based Robots and Extended Kalman Filter**. Rio de Janeiro, 2012. 120p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work addresses the problem of Simultaneous Localization and Mapping in structured environments using a mobile robot equipped with sonar, electronic compass and encoders. In the proposed modeling there are the construction of the environment map and the robot localization interactively. The proposed method, called H-SLAM (Hybrid - Simultaneous Localization and Mapping), makes use kinds of environment representation: Occupancy Grid Map and Continuous Representation. The Occupancy Grid Map divides the environment into small equal parts, and classifies it as occupied or empty. The Continuous Representation uses lines to represent detected planes in the environment, forming a two-dimensional map. Each line of the map is considered a landmark. Every time a plan is redetected by the robot the corresponding line to it is rebuild with the new points obtained and the robot's position is updated through Extended Kalman Filter. The model effectiveness was proved with computer simulations in three virtual environments. Using a prototype developed with LEGO Mindstorms platform three other experiments were also performed in real environments. The results demonstrated the effectiveness of the proposed method.

## Keywords

Mobile Robotics; SLAM; Sonar; Extended Kalman Filter;

## Sumário

1	Introdução.....	14
1.1	Motivação.....	19
1.2	Objetivos.....	19
1.2.1	Gerais.....	19
1.2.2	Específicos.....	19
1.3	Contribuições deste Trabalho .....	20
1.4	Organização do Trabalho.....	20
2	Fundamentação Teórica .....	21
2.1	Robótica Móvel .....	21
2.2	Localização e Mapeamento Simultâneos, .....	24
2.3	O Sonar.....	25
2.3.1	Limitações do Sonar.....	30
2.4	Representação do Ambiente .....	32
2.4.1	Representação Contínua.....	33
2.4.2	Representação em Grade.....	37
2.5	Filtro de Kalman Estendido .....	42
3	Localização e Mapeamento Simultâneos - Híbrido .....	48
3.1	Algoritmo .....	48
3.2	Extração de Pontos.....	50
3.3	Criação da Grade de Ocupação .....	53
3.4	Clusterização dos Pontos e Criação das Retas .....	58
3.5	Detecção e Atualização das Retas .....	63
3.6	Atualização da Pose do robô por Filtro de Kalman Estendido.....	65
4	Resultados.....	69
4.1	O simulador.....	70
4.2	Ambientes de Simulação e Ambientes Reais.....	72
4.3	Parâmetros e Configurações .....	76
4.4	Ambiente 1: Quarto Vazio .....	77
4.5	Ambiente 2: Corredor em laço fechado .....	83
4.6	Ambiente 3: Escritório.....	90
4.7	Ambiente 4: Ensaio em um ambiente real em “L” .....	97
4.8	Ambiente 5: Corredor .....	101
4.9	Ambiente 6: Parte do corredor do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.....	103
4.10	Discussão dos Resultados.....	108
4.10.1	Como o ambiente interfere no Problema de Localização e Mapeamento Simultâneos .....	108
4.10.2	A bússola é realmente necessária?.....	108
4.10.3	Vantagens e Desvantagens de manter dois tipos de mapas .....	110
4.10.4	Retas limitadas ou ilimitadas? .....	113
4.10.5	Influência do controle e do planejamento de trajetória no mapeamento.....	114
4.10.6	Somente retas é o suficiente? .....	115
5	Conclusão .....	116
5.1	Trabalhos Futuros .....	116
6	Referências Bibliográfica.....	118

## Lista de Figuras

Figura 1 – Área de percepção do sonar PING)))TM Ultrasonic Distance Sensor (#28015). (Specifications, 2009).....	16
Figura 2 - Protótipo utilizado para testes em ambientes reais, vista 1.....	17
Figura 3 - Protótipo utilizado para testes em ambiente reais, vista 2.....	18
Figura 4 - Exemplo de robôs. (a) AIBO - Robô cachorro da Sony, (b) ASIMO - humanóide da honda, (c) Submarino explorador desenvolvido pelo departamento de robótica da Universidade japonesa Ritsumeikan, (d) Predator – Veículo aéreo não tripulado utilizado pela força aérea dos Estados Unidos, (e) SUGV – Robô militar da iRobot especializado em situações arriscadas como desarmamento de bombas, (f) Roomba – Robô aspirador de pó, também da iRobt. ....	22
Figura 5 – Cinemática Direta de um robô móvel com drive diferencial. ....	24
Figura 6 - Propagação da onda sonora até o obstáculo, (Specifications, 2009). ....	26
Figura 7 - Cone inscrito dentro do lóbulo principal do sonar, adaptado de (Siegwart & Nourbakhsh, 2004). ....	28
Figura 8 - Specular Reflection (Specifications, 2009).....	31
Figura 9 - Specular Reflections em cantos côncavos.....	32
Figura 10 - Leitura típica de um LRF. O sensor encontra-se na posição (0,0) orientado em 90o e possui ângulo de varredura de 180o. ....	34
Figura 11 - Modelo da leitura de um sonar e sua incerteza (J L Crowley, 1989). ....	35
Figura 12 - Exemplo do modelo FPA, (Lee & Song, 2010). ....	36
Figura 13 – Exemplo da decomposição exata (exact cell decomposition). Adaptado de (Siegwart & Nourbakhsh, 2004).....	37
Figura 14 - Representação Topológica, (Siegwart & Nourbakhsh, 2004).....	38
Figura 15 - Representação em grid, adaptado de (Siegwart & Nourbakhsh, 2004).....	38
Figura 16 - Modelagem de uma leitura do sonar em um mapa em grid. Adaptado de (Moravec & Elfes, 1985).....	40
Figura 17 - Leitura típica do sonar modelado por (A Elfes, 1991) em 3D. ....	41
Figura 18 - Exemplo de leitura 2D do sonar utilizando o modelo de (Konolige, 1997). ....	42
Figura 19 - Aumento da covariância ao longo do deslocamento linear.....	46
Figura 20 – Exemplo de correção de trajetória via Filtro de Kalman Estendido.....	47
Figura 21 - Algoritmo do Modelo.....	50
Figura 22 - Características de uma leitura do sonar. ....	51
Figura 23 - Estimção de três pontos com uma única leitura do sonar.....	52
Figura 24 – Representação 2D da leitura do sonar. ....	54
Figura 25 - Função peso para regiões ocupadas, PO.....	56
Figura 26 - Função peso para regiões vazias, PE.....	56

Figura 27 - Mapa logarítmico que engloba as regiões ocupadas e vazias.....	58
Figura 28 - Robô movimentado-se ao longo do corredor. ....	59
Figura 29 - Exemplo de clusterização pelo DBSCAN, minp = 4. ....	60
Figura 30 - Robô locomovendo-se ao longo de uma quina formada por duas paredes.....	61
Figura 31 - Reta localizada no espaço de Hough.....	63
Figura 32 - Exemplo de reta que está no campo de visão do sonar. ....	63
Figura 33 - Exemplo de reta que não está no campo de visão do sonar.....	64
Figura 34 - Modelo do robô usado. ....	69
Figura 35 - 10 mil amostras do modelo de locomoção. ....	71
Figura 36 - Histograma da orientação para as 10 mil amostras.....	72
Figura 37 - Quarto Vazio. ....	74
Figura 38 - Corredor em laço fechado. ....	74
Figura 39 - Escritório. ....	75
Figura 40 - Ambiente real em "L". ....	75
Figura 41 - Corredor.....	75
Figura 42 - Ambiente real, parte do corredor do departamento de engenharia elétrica da PUC-Rio. ....	76
Figura 43 - Trajetórias das estimações via LMS-H (em vermelho) e Estimação Simples (em verde) e do robô real (em azul) para o ambiente: quarto vazio. ....	78
Figura 44 - Erros em X, Y e $\theta$ da posição do robô no quarto vazio. ....	79
Figura 45 - Erro do modelo proposto em X com o intervalo de confiança de 99% no quarto vazio.....	79
Figura 46 - Erro em Y do LMS-H com o intervalo de confiança de 99% no quarto vazio.....	80
Figura 47 - Erro euclideano das estimações no quarto vazio.....	81
Figura 48 - Mapa de ocupação em grade do quarto vazio. ....	81
Figura 49 - Região Ocupada para o ambiente quarto vazio. Limiar superior de 0.5.....	82
Figura 50 - Região Desocupada para o ambiente quarto vazio. Limiar inferior de -0.5.....	82
Figura 51 - Trajetória do corredor em laço fechado. ....	83
Figura 52 - Trajetórias das estimações via LMS-H (em vermelho) e Estimação Simples (em verde) e do robô real (em azul) para o ambiente: corredor em laço fechado. ....	84
Figura 53 - Erros no eixo X, Y e $\theta$ do robô no corredor em <i>Loop</i> .....	85
Figura 54 - Erro em X e o intervalo de confiança de 99% no corredor em <i>Loop</i> .....	86
Figura 55 - Erro no eixo Y e a região de confiança de 99% no corredor em <i>Loop</i> .....	87
Figura 56 - Erro euclidiano entre o robô real, o robô estimado via LMS-H e a Estimação Simples no corredor em <i>Loop</i> . ....	87
Figura 57 - Mapa de ocupação em grade do ambiente do corredor em <i>Loop</i> .....	89
Figura 58 - Região ocupada no ambiente do corredor em <i>Loop</i> . Limiar superior de 0.5.....	89
Figura 59 - Região vazia no ambiente do corredor em <i>Loop</i> . Limiar inferior de -0.5.....	90

Figura 60 - Trajetória do Robô no ambiente Escritório.....	91
Figura 61 - Trajetórias das estimações via LMS-H (em vermelho) e Estimação Simples (em verde) e do robô real (em azul) para o ambiente: escritório. ....	92
Figura 62 - Erro no eixo X, Y, e, $\theta$ no ambiente Escritório.....	93
Figura 63 - Erro em X com o intervalo de confiança de 95%.....	93
Figura 64 - Erro em Y com o intervalo de confiança de 95%.....	94
Figura 65 - Mapa de ocupação em grade para o ambiente 3. ....	95
Figura 66 - Região mapeada como ocupada em branco pelo LMS-H no ambiente Escritório. Limiar superior de 0.5.....	95
Figura 67 - Região mapeada como desocupada em branco pelo LMS-H no ambiente Escritório. Limiar inferior de -0.5. ....	96
Figura 68 - Erro euclidiano do robô no ambiente Escritório.....	97
Figura 69 - Ambiente real em "L" .....	98
Figura 70 - Mapeamento e Trajetória no ambiente real em "L". ....	99
Figura 71 - Grade de ocupação para ambiente real em "L" .....	99
Figura 72 - Região ocupada para o ambiente real em "L". Limiar superior de 0.5.....	100
Figura 73 - Região desocupada para o ambiente real em "L". Limiar de -0.5.....	100
Figura 74 - Todas as leituras do sonar não utilizadas para o ambiente real em "L" .....	101
Figura 75 - Mapeamento e Trajetória para o ambiente real Corredor.....	102
Figura 76 - Grade de ocupação para ambiente real Corredor. ....	102
Figura 77 - Região ocupada para o ambiente real Corredor. Limiar superior de 0.5.....	103
Figura 78 - Região desocupada para o ambiente real Corredor. Limiar inferior de -0.5. ....	103
Figura 79 - Trajetória do robô no Ambiente 6 .....	104
Figura 80 - Retas extraídas do Ambiente 6.....	105
Figura 81 - Região ocupada para o Ambiente 6. Limiar superior de 0.5 .....	106
Figura 82 - Região desocupada para o Ambiente 6. Limiar inferior de -0.5 .....	106
Figura 83 - Grade de ocupação para Ambiente 6. ....	107
Figura 84 - Localização de um robô conhecendo a distância e o ângulo a um ponto.....	109
Figura 85 - Localização de um robô através de duas retas não paralelas.....	110
Figura 86 - Campos Potenciais para navegação (Siegwart & Nourbakhsh, 2004).....	112
Figura 87 - Planos pouco inclinados e correspondência errada. ....	114

## Lista de Símbolos

$\beta$	-	Abertura do Cone do Sonar
$\alpha$	-	Coordenada angular da reta no sistema de coordenadas de Hough;
$\rho$	-	Coordenada linear da reta no sistema de coordenadas de Hough;
a, b, c	-	Parâmetros da equação paramétrica da reta;
$PC$	-	Ponto da reta de menor distância ao centro do sistema de coordenadas;
$z$	-	Uma observação do sonar;
$v_{som}$	-	Velocidade do Som no Ar;
$d$	-	Distância captada pelo sonar;
$d_{min}$	-	Mínimo alcance do sonar;
$d_{max}$	-	Máximo alcance do sonar;
$\varepsilon$	-	Símbolo para expressar erro;
$\delta$	-	Distância do sonar a um ponto no ambiente;
LRF	-	Lazer Range Finder;
SLAM	-	Simultâneos Localization and Mapping
LMS-H	-	Localização e Mapeamento Simultâneos - Híbrido
FKE	-	Filtro de Kalman Estendido
$\theta$	-	Orientação do robô
$v$	-	Velocidade linear do robô
$w$	-	Velocidade angular do robô
$v_L$	-	Velocidade linear da roda esquerda do robô
$v_R$	-	Velocidade linear da roda direita do robô
$l$	-	Comprimento do eixo do robô
$\varphi$	-	Ângulo de incidência do som com a superfície
$u$	-	Sinal de comando para o robô.
$\mu$	-	Média de uma variável aleatória gaussiana.
$\sigma^2$	-	Variância de uma variável aleatória gaussiana.
$\Sigma$	-	Covariância de uma gaussiana multivariada.
$TOF$	-	<i>Time of Flight</i> (Tempo de Voo): Tempo decorrido para que o som emitido pelo sonar retorne.
$FPA$	-	Foot Print Association
$\phi$	-	Raio da Vizinhança (Parâmetro do DBSCAN)
$mim_p$	-	Mínimo número de pontos para formar um agrupamento (parâmetro DBSCAN)

*Qual seria a sua idade  
se você não soubesse quantos anos você tem?*

Confúcio