



**JUSTO EMILIO ALVAREZ JÁCOBO**

# **Geração de Mapas de ambientes utilizando um Sistema de Percepção LIDAR – 3D**

95/2014

**CAMPINAS  
2013**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

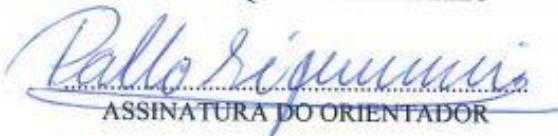
**JUSTO EMILIO ALVAREZ JÁCOBO**

**Geração de Mapas de ambientes utilizando um  
Sistema de Percepção LIDAR – 3D**

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, para a obtenção do título de Doutor(a) em Engenharia Mecânica, na Área de Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico.

Orientador Prof. Dr. Pablo Siqueira Meirelles

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO  
FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO JUSTO  
EMILIO ALVAREZ JÁCOBO E ORIENTADA PELO  
PROF. DR. PABLO SIQUEIRA MEIRELLES

  
ASSINATURA DO ORIENTADOR

**CAMPINAS  
2013**

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

AL86g Alvarez-Jácomo, Justo Emilio, 1973-  
Geração de mapas de ambientes utilizando um sistema de percepção LIDAR -  
3D / Justo Emilio Alvarez Jácomo. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Pablo Siqueira Meirelles.  
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de  
Engenharia Mecânica.

1. Navegação autônoma. 2. Visão de robô. 3. Percepção sensorial. 4.  
Modelagem 3D. I. Meirelles, Pablo Siqueira, 1956-. II. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Environmental maps generation using LIDAR - 3D perception system

**Palavras-chave em inglês:**

Autonomous navigation

Robot vision

Sensory perception

3D modeling

**Área de concentração:** Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

**Titulação:** Doutor em Engenharia Mecânica

**Banca examinadora:**

Pablo Siqueira Meirelles [Orientador]

Douglas Eduardo Zampieri

Ely Carneiro de Paiva

Claudio Garcia

Luciano Luporini Menegaldo

**Data de defesa:** 06-12-2013

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL**

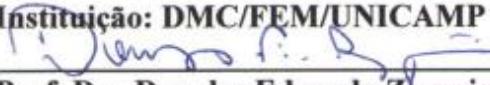
**TESE DE DOUTORADO**

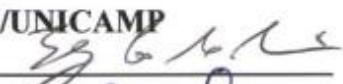
**Geração de Mapas de ambientes utilizando um  
Sistema de Percepção LIDAR – 3D**

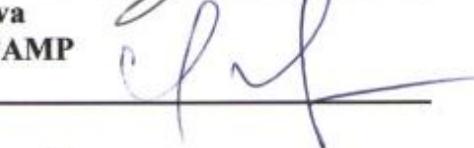
Autor: Justo Emilio Alvarez Jácobo  
Orientador: Prof. Dr. Pablo Siqueira Meirelles

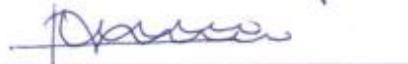
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

  
**Prof. Dr. Pablo Siqueira Meirelles, Presidente**  
**Instituição: DMC/FEM/UNICAMP**

  
**Prof. Dr. Douglas Eduardo Zampieri**  
**Instituição: Professor Visitante FEM/UNICAMP**

  
**Prof. Dr. Ely Carneiro de Paiva**  
**Instituição: DPM/FEM/UNICAMP**

  
**Prof. Dr. Claudio Garcia**  
**Instituição: USP/São Paulo**

  
**Prof. Dr. Luciano Luporini Menegaldo**  
**Instituição: UFRJ/Rio de Janeiro**

Campinas, 6 de dezembro de 2013

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho aos que já não estão, mas sempre viverão dentro de nós, Dom Justo German Alvarez Tohalino (*in memorian*) e Dona Maria Helena Daniel Lima (*in memorian*), como gratidão por tudo que fizeram por nós, aos nossos filhos Pietro (*in memorian*) e Catarina, e a todos nossos sobrinhos como símbolo da esperança de um futuro melhor.

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, Senhor de todas as coisas, pela saúde, amizade, e principalmente por jamais ter-me deixado sozinho na aventura da vida e deste sonho em concreto.

Meu profundo agradecimento ao Prof. Pablo Siqueira pela orientação deste trabalho e por tudo o que fez por mim desde o primeiro dia que o conheci; o mesmo agradecimento ao Prof. Douglas Zampieri por ter confiado em mim para este projeto.

Meu agradecimento eterno a minha amada esposa Carolina, a minha maravilhosa mamita Modesta, aos meus irmãos Ramiro e Isabelita, aos meus tios Elma e Anízio, por todo o apoio, incentivo e compreensão ao longo destes anos.

Meu agradecimento especial ao meu amigo e irmão Arthur de Miranda Netto pela enorme contribuição à Tese e, principalmente por acreditar em mim. A todos os Professores e colegas do DMC de todos estes anos, em especial aos amigos do LMA: Danilo Habermann, Giovanni Bernardes, João Luís Martins, Nilson Pereira, Fabio Santiciolli, Luiz Gustavo Turatti, Juliano Iossaqui.

Uma especial menção a Juan Harold e Delia, meus mestres de vida nestes últimos anos. Também gostaria de deixar meu muito obrigado aos meus amigos conterrâneos: Richard, Carlitos & Patrícia (peruana de coração), Mario, José, Rossana, Haroldo, Helmo, René e outros, pela amizade e pelos preciosos momentos que juntos vivemos neste maravilhoso Brasil. Também para os vendedores de sonhos: Lú & Ronaldo, Lê & Silvia, Cris & Rosi, Patric & Marcela, Sandrinha, Kizzy, e muitos outros PdR, por me fazerem acreditar em um mundo melhor.

Meu agradecimento ao Conselho de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela ajuda financeira para a realização deste trabalho.

**“Invictus**

*Out of the night that covers me  
Black as the pit from pole to pole  
I thank whatever gods may be  
For my unconquerable soul.*

*In the fell clutch of circumstance  
I have not winced nor cried aloud  
Under the bludgeonings of chance  
My head is bloody, but unbowed.*

*Beyond this place of wrath and tears  
Looms but the horror of the shade,  
And yet the menace of the years  
Finds, and shall find, me unafraid.*

*It matters not how strait the gate,  
How charged with punishments the scroll,  
**I am the master of my fate**  
**I am the captain of my soul”.***

*William Ernest Henley (1849-1903), inspiration for Nelson Mandela*

**“Invictus**

*Fuera de la noche que me cubre,  
Negra como el abismo de polo a polo,  
Agradezco a cualquier dios que pudiera existir  
Por mi alma inconquistable.*

*En las feroces garras de las circunstancias  
Ni me he lamentado ni he dado gritos.  
Bajo los golpes del azar  
Mi cabeza sangra, pero no se inclina.*

*Más allá de este lugar de ira y lágrimas  
Es inminente el Horror de la sombra,  
Y sin embargo la amenaza de los años  
Me encuentra y me encontrará sin miedo.*

*No importa cuán estrecha sea la puerta,  
Cuán cargada de castigos la sentencia,  
Soy el amo de mi destino:  
Soy el capitán de mi alma”.*

*William Ernest Henley (1849-1903), inspiración de Nelson Mandela*

## **Resumo**

Este trabalho apresenta o estudo e desenvolvimento de um Sistema de Percepção baseado na utilização de sensores telemétricos tipo LIDAR. Uma plataforma de escaneamento a laser em três dimensões LMS-3D foi construída a fim de permitir a navegação autônoma de robôs. A área navegável foi obtida a partir de mapas telemétricos, caracterizados com algoritmos de grades de ocupação (GO) (em duas dimensões com a terceira colorida e 3D) e com o cálculo de gradientes vetoriais. Dois tipos de áreas navegáveis foram caracterizadas: (i) área de navegação primária representada por uma área livre dentro da GO; e (ii) área de navegação contínua representada pela soma das áreas contínuas e gradientes classificados com um determinado limiar. Este limiar indica se uma área é passível de navegação considerando as características do robô. A proposta foi avaliada experimentalmente em ambiente real, contemplou a detecção de obstáculos e a identificação de descontinuidades.

*Palavras Chave:* Navegação (semi-) autônoma; Visão Computacional, Mapas Digitais; Percepção do ambiente; LIDAR-3D; Grades de Ocupação; Gradientes Vetoriais.

## **Abstract**

This thesis was proposed to demonstrate the study and development of a Perception System based on the utilization of a LIDAR telemetric sensors. It was proposed to create a LMS-3D three dimension laser scanning platform, in an attempt to promote the Autonomous Robot Navigation. The scanned area was obtained based on telemetric maps, which was characterized with Occupancy Grid algorithms (OG) (in two dimensions with the third colored and 3D) and with Vector Gradients calculation. Two different navigation areas were characterized: (i) primary area of navigation, that represents the free area inside a OG, and (ii) continuous navigation area, that represents the navigated area composed by the sum of continuous areas and the gradients classified for a determined threshold, which indicates the possible navigated area, based on the robot characteristics. The proposition of this thesis was evaluated in a real environment and was able to identify the obstacles detection and also the discontinuance.

*Key words:* (Semi-) Autonomous Navigation; Computational Vision; Digital Maps; Environmental Perception; LIDAR - 3D; Occupancy Grid; Gradient Vector.

## Lista de Ilustrações

### **Capítulo 1**

	Página
Figura 1.1 – Mapa humano, ilustração da representação de um exemplo de mapa topológico do metrô de Lisboa, com todas as estações identificadas por prédios particulares ou outras características/marcas importantes (VALE, 2005).....	2
Figura 1.2 - Comportamento da formiga <i>Cataglyphis fortis</i> navegando no deserto: (a) Mapa métrico e rota (MULHER; WEHNER, 1988); (b) Detalhe do tamanho das patas de formiga; (c) Distâncias percorridas no experimento com variação do passo (WITTLINGER, 2007); (d) Navegação olfativa espacial, “olfato estéreo” (MAX PLANCK INSTITUTE FOR CHEMICAL ECOLOGY, 2010).....	4
Figura 1.3 - Principais causas de acidentes de trânsito (IRU, 2007).....	7
Figura 1.4 - Visualização abstrata das camadas principais dos sistemas semi- e autônomos: (a) simplificada (Miranda Neto, 2011); e (b) por tarefas específicas executáveis. As camadas de interface entre Percepção-Sensores e Navegação & Controle-Atuadores, são consideradas intrínsecas.....	9
Figura 1.5 - Espaço Navegável: (a) Sistema Multisensor Laser / Visão (DAHLKAMP, 2006); (b) Sistema baseado em Visão (ÁLVAREZ; LOPEZ, 2011).....	10
Figura 1.6 - Sistema Comercial <i>Mobileye</i> (Monocular) .....	11
Figura 1.7 - Resultados da fusão de grades de ocupação tipo pessimista, em ambiente dinâmico, a partir de dados obtidos por uma câmera <i>Mobileye</i> .....	11
Figura 1.8 – HDL-64E <i>Velodyne</i> (a) Media da refletividade em infravermelho; (b) Desvio padrão dos valores de refletividade infravermelha; (c) a localização GPS induz um metro de erro; (d) Nenhum erro perceptível após localização (LEVINSON; THRUN, 2010).....	12

### **Capítulo 2**

Figura 2.1: Componentes principais dos Sistemas Autônomos e Semi-autônomos .....	19
Figura 2.2 - Arquitetura do Veículo Terrestre .....	20
Figura 2.3 – (a) Robô JUNIOR com seu (b) Diagrama de Fluxo e Módulos, equipe <i>Stanford University</i> , segundo lugar da competição <i>Urban Challenger</i> (BUEHLER et al., 2009).....	21

Figura 2.4 - Leitura do espaço de trabalho/interação baseada em informações proprioceptivas do veículo, sensores exteroceptivos, de proximidade e telemétricos.....	23
Figura 2.5 – Localização de veículos de alta precisão (MATTERN et al., 2010).....	24
Figura 2.6 – Modelo Híbrido de Localização .....	25
Figura 2.7 – Tipos de Navegação, resumidos segundo Desouza e Kak (2002) com alguns destaques .....	28
Figura 2.8 - Tipos de “conhecimentos/percepções” que um robô autônomo móvel “cognitivo” precisaria ter: i) métrico (amarelo); ii) simbólico (laranja); e iii) conceitual (vermelho) segundo a pesquisa de Stiller e Ziegler (2012).....	41
Figura 2.9 - A Grade de Ocupação detectada pelo algoritmo de Oniga et al., (2009), mostrado em 3-D: a cor azul representa a estrada, a cor vermelha, os obstáculos, a cor amarela as ilhas de tráfego.....	48
Figura 2.10 - Modelos de representação espacial, construídos a partir de um conjunto de pontos gerados por um sistema LIDAR, com nível de discretização de 0.2 m: (a) Modelo do tipo grade de ocupação; (b) modelo com grade de discretização tipo 3D-NDT; (c) modelo com discretização tipo “Octree” 3D-NDT; e (d) modelo de malha triangular (STOYANOV et al., 2013).....	51

### **Capítulo 3**

Figura 3.1 - Princípio de funcionamento, medições do tempo de vôo, os sinais emitidos pelo emissor e refletidos dos objetos são detectados pelo receptor.....	54
Figura 3.2 – Diagrama modular de um medidor de distância por comparação de fase (NETTO, 2000).....	54
Figura 3.3 – Modulação das amplitudes: (a) onda portadora, sinal de medição de baixa e alta frequência, (b) superposição do sinal portador e dos sinais de medição com a correspondente onda refletida (NUCHTER, 2009).....	56
Figura 3.4 - Princípio de funcionamento dos medidores de distância por triangulação.....	57
Figura 3.5 – Scanner a Laser tipo industrial da marca SICK: (a) LMS 291 (outdoor, campo de visão: 180°; resolução angular: 0.25°, 0.5° e 1°; alcance: 30 m); (b) LMS 111 (outdoor, campo de visão: 270°; resolução angular: 0.5° e 1°; alcance: 20 m).....	58
Figura 3.6 – Nuvens de pontos 3D produzidos por 2 métodos de escaneamento: (a) <i>scanner pitching</i> ; e (b) <i>scanner yawing</i> (NUCHTER, 2009).....	60

Figura 3.7 – Informações 3-D podem ser calculadas baseadas na projeção de uma linha (a) a um ângulo conhecido; (b) esquinas pré-definidas, podem ajudar a calcular a profundidade, caso o ângulo de projeção seja desconhecido (NUCHTER, 2009).....	61
Figura 3.8 – Aplicações para os sistemas LIDAR-3D (algumas figuras foram extraídas do site: <a href="http://www.network-mapping.com">www.network-mapping.com</a> ).....	63
Figura 3.9 - Princípio de funcionamento do protótipo <i>scanner</i> portátil a laser 3-D desenvolvido na China por Zhang et al., (2008).....	64
Figura 3.10 - Percepção do <i>scanner</i> a laser 3-D dentro de um túnel, figura original de Hunter et al. (2006).....	65
Figura 3.11 – SICK LMS 291-05: (a) Detalhes dos principais componentes internos; (b) vista externa do sensor.....	70
Figura 3.12 – Espaçamento dos raios e diâmetro do <i>spot</i> em relação ao alcance para diversos equipamentos SICK, retirado do manual de Descrição Técnica LMS (SICK, 2003).....	71
Figura 3.13 – Interfaces para LMS-SICK (2D): (a) imagem da tela do software LMI-SICK, S. O. Windows; (b) imagem 2D gerada pelo programa <i>Toolbox Sick LIDAR</i> (MATLAB), S.O. Linux.....	72
Figura 3.14 – Imagem da Interface LMS23 ( <i>Laser Measurement Systems Software 3D</i> ), desenvolvida para escaneamento 3D e fusão de sensores (LIDAR-3D + monovisão) utilizando recursos GUI do MATLAB.....	73
Figura 3.15 – Protótipo LMS-3D: (a) Diagrama de Blocos e (b) vista frontal do Módulo LMS-3D com uma câmera digital sobreposta.....	74

## **Capítulo 4**

Figura 4.1 - Projeção de um espaço livre de navegação dentro do plano da imagem, detalhes da construção da Grade de Ocupação por fusão de sensores dentro de um sistema de percepção de um veículo, pesquisa relacionada a Moras et al. (2012).....	83
Figura 4.2 - (a) De cima para baixo, vistas parciais da (a1) altura e (a2) distância horizontal, para detecção de: (a3) objetos verticais, (a4) terreno, e (a5) objetos espalhados; (b) Mapas de grades experimentais com classificação de objetos, determinados a partir da componente Z, normal à superfície. Resultados de Riaz et al. (2010).....	84

Figura 4.3 - (a) Nuvem de pontos gerados a partir da estimativa da posição e de um sistema <i>LMS Hokuyo</i> ( <i>micro-UAV</i> ); (b) Representação de dados MVOG, pesquisa relacionada com Morris et al. (2011).....	85
Figura 4.4 -Representação gráfica da estratégia adotada para geração de mapas GO 2C-D: (a) Célula referencial $C_{i,j}$ dentro do mapa de ocupação em 2D (eixos X-Y); (b) Célula referencial nos eixos X-Z, altura da nuvem ( $k$ ) de pontos que está dentro da célula ( $P_{x,y,z}$ ).....	88
Figura 4.5 - Representação gráfica da estratégia adotada para geração de mapas GO 3D: (a) Célula referencial $C_{i,j,k}$ dentro do mapa de ocupação em 3D (eixos X-Y); (b) Célula referencial nos eixos X-Z, altura da nuvem ( $k$ ) de pontos dentro da camada correspondente ( $P_{x,y,z}$ ).....	90
Figura 4.6 - Representação gráfica da estratégia adotada para geração do mapa vetorial $p_1$ (gradiente leste - L): (a) Célula referencial $C_{i,j}$ e relacionada dentro do mapa de grades de ocupação 2D (eixos X-Y); (b) Células referencial e relacionada nos eixos X-Z.....	94
Figura 4.7 - Representação gráfica da estratégia adotada para geração do mapa vetorial $p_2$ (gradiente sudeste - SE): (a) Célula referencial $C_{i,j}$ e relacionada $C_{i+1,j-1}$ dentro do mapa de grades de ocupação 2D (eixos X-Y); (b) Células referencial e relacionada nos eixos X-Z.....	95
Figura 4.8 - Representação gráfica da estratégia adotada para geração do mapa vetorial $p_3$ (gradiente sul - S): (a) Célula referencial $C_{i,j}$ e relacionada $C_{i,j-1}$ dentro do mapa de grades de ocupação 2D (eixos X-Y); (b) Célula referencial e relacionada nos eixos Y-Z.....	96
Figura 4.9 - Representação gráfica dos mapas vetoriais $p_1, p_2, p_3, p_4$ e $p_5$ gerados para a célula referencial $C_{i,j}$ , dentro de um mapa de grades de ocupação 2D.....	97
<b>Capítulo 5</b>	
Figura 5.1 – Protótipo do sistema de percepção LMS-3D: (a) vista completa do sistema mostrando o Laser SICK LMS 291-05; (b) Plataforma posicionadora (motor de passo, encoder, engrenagens, estrutura metálica, etc.); (c) Sistema LMS-3D em cima do seu tripé, pronto para o escaneamento; (d) vista interna da caixa de controle (placas controladoras e de alimentação).....	102
Figura 5.2 – Sistema de Percepção LMS-3D: (a) pontos capturados sem filtragem; (b) nuvem de pontos após filtragem; (c) vista frontal dos pontos amostrados.....	105

Figura 5.3 – Mapa sensorial de uma pessoa adulta (sexo masculino) com aproximadamente 1,68m de altura gerada a partir do Sistema de Percepção LMS-3D: (a) Vista frontal; (b) Vista em perspectiva; (c) vista lateral, com detalhe da vista superior.....	106
Figura 5.4 – Mapa sensorial da parte superior de uma pessoa adulta (sexo masculino) gerado a partir do Sistema de Percepção LMS-3D: (a) vista lateral direita; (b) vista frontal; e (c) vista lateral esquerda.....	107
Figura 5.5 – Mapa sensorial do ESTUDO DE CASO I, escaneamento de um ambiente interno, estruturado, gerado a partir do Sistema de Percepção LMS-3D: (a) fotografia do ambiente (panorâmica de 180°); (b) vista frontal da nuvem de pontos do Mapa Sensorial; (c) vista superior.....	110
Figura 5.6 – Comparativo da fotografia e do Mapa Sensorial do ESTUDO DE CASO I, detalhes da nuvem de pontos com 4 casos particulares que evidenciam objetos: (i) plataforma e caixa metálica retangular (transformador em cima de uma plataforma de concreto); (ii) janela de vidro parcialmente aberta; (iii) caixa metálica retangular elevada do piso; (iv) detalhe das quinas de duas paredes.....	111
Figura 5.7 – Mapa de Grades de Ocupação (Mapa GO-2C-D) do ESTUDO DE CASO I comparado com o Mapa Sensorial (Sistema de Percepção LMS-3D): (a) vista superior do Mapa Sensorial; (b) Mapa de Grades de Ocupação 2C-D, com a barra de alturas em cores. As células são de 20x20 cm.....	112
Figura 5.8 – Mapa de Grades de Ocupação (Mapa GO-3D) do ESTUDO DE CASO I, com a barra de alturas em cores. As células são de 20x20x20 cm.....	114
Figura 5.9 – Comparativo da fotografia panorâmica e do Mapa Grades de Ocupação (Mapa GO-3D) do ESTUDO DE CASO I, detalhes da formação de objetos a partir das células 3D (“tijolos”): (i) caixa de plástico retangular (depósito de líquido para limpeza); (ii) parte do tripé, que sustenta o Sistema LMS-3D; (iii) detalhe das cadeiras do lado direito do corredor. As células são de 20x20x20 cm.....	114
Figura 5.10 – Mapas Vetoriais (baseado em gradientes e tendências do movimento) do ESTUDO DE CASO I: (a) mapa vetorial $p_1$ (gradiente L); (b) (a) mapa vetorial $p_2$ (gradiente SE); (c) mapa vetorial $p_3$ (gradiente S). As células são de 20x20 cm.....	115
Figura 5.11 – Mapas Vetoriais (baseado em gradientes e tendências do movimento) do ESTUDO DE CASO I: (a) mapa vetorial $p_4$ (gradiente SO); (b) (a) mapa vetorial $p_5$ (gradiente O); (c) mapa vetorial $p_{max} = max$ (gradientes). As células são de 20x20 cm.....	116
Figura 5.12 – Comparativo entre os mapas gerados para o ESTUDO DE CASO I: (a) Mapa Sensorial (Sistema de Percepção LMS-3D); (b) Mapa de grades de ocupação 2C-D, com a barra de alturas em cores (lado direito); (c) Mapa de vetores $p_{max}$ (gradiente máximo), com barra de % gradiente (lado esquerdo). As células são de 20x20 cm.....	117

Figura 5.13 – Mapa sensorial do ESTUDO DE CASO II, escaneamento de um ambiente interno, estruturado, gerado a partir do Sistema de Percepção LMS-3D: fotografia do ambiente; (a) Vista frontal da nuvem de pontos; (b) vista lateral; (c) vista superior.....	119
Figura 5.14 – Mapa de Grades de Ocupação (Mapa GO-3D) do ESTUDO DE CASO II, com a barra de alturas em cores, comparado com seu Mapa sensorial. As células são de 20x20x20 cm.....	120
Figura 5.15 – Mapas Vetoriais (baseado em gradientes e tendências do movimento) do ESTUDO DE CASO II: (a) mapa vetorial $p1$ (gradiente L); (b) (a) mapa vetorial $p2$ (gradiente SE); (c) mapa vetorial $p3$ (gradiente S). As células são de 20x20 cm.....	121
Figura 5.16 – Mapas Vetoriais (baseado em gradientes e tendências do movimento) do ESTUDO DE CASO II: (a) mapa vetorial $p4$ (gradiente SO); (b) (a) mapa vetorial $p5$ (gradiente O); (c) mapa vectorial $p_{max} = \max$ (gradientes). As células são de 20x20 cm.....	122
Figura 5.17 – Comparativo entre os mapas gerados para o ESTUDO DE CASO II: (a) Mapa Sensorial (Sistema de Percepção LMS-3D); (b) Mapa de grades de ocupação 2C-D, com a barra de alturas em cores (lado direito); (c) Mapa de vetores $p_{max}$ (gradiente máximo), com barra de % gradiente (lado esquerdo). As células são de 20x20 cm.....	123
Figura 5.18 – Mapas sensoriais do ESTUDO DE CASO III, escaneamento de um ambiente interno, estruturado, gerado a partir do Sistema de Percepção LMS-3D: (a) Fotografia do ambiente para o CASO III; (b) detalhe vista lateral (observar as escadas); (c) vista superior; (d) vista frontal.....	124
Figura 5.19 – Mapa de grades de ocupação (Mapa GO-3D), ESTUDO DE CASO III, com a barra de alturas em cores, comparado com seu Mapa sensorial. As células são de 20x20x20 cm.....	125
Figura 5.20 – Mapas Vetoriais (baseado em gradientes e tendências do movimento) do ESTUDO DE CASO III: (a) mapa vetorial $p1$ (gradiente L); (b) mapa vetorial $p2$ (gradiente SE); (c) mapa vectorial $p3$ (gradiente S). As células são de 20x20 cm.....	126
Figura 5.21 – Mapas Vetoriais (baseado em gradientes e tendências do movimento) do ESTUDO DE CASO III: (a) mapa vetorial $p4$ (gradiente SO); (b) mapa vetorial $p5$ (gradiente O); (c) mapa vetorial $p_{max} = \max$ (gradientes). As células são de 20x20 cm.....	126
Figura 5.22 – Comparativo entre os mapas gerados para o ESTUDO DE CASO III: (a) mapa sensorial (Sistema de Percepção LMS-3D); (b) Mapa de vetores $p_{max}$ (gradiente máximo), com barra de % gradiente (lado esquerdo); (c) Mapa de grades de ocupação 2C-D, com a barra de alturas em cores (lado direito). As células são de 20x20 cm.....	127

## **ANEXO A**

Figura A.1 - Vista do módulo *Sb Power Step* para controlar motores de passo, (a) placa terminada, (b) disposição dos componentes..... 148

## **ANEXO B**

Figura B.1 - Vista do módulo experimental *Sb Powerboard*, (a) placa terminada na versão completa, (b) configuração da placa na versão *Sb Powerboard Lite*..... 150

Figura B.2 - Vista das portas do módulo experimental *Sb Powerboard Lite*..... 152

## **ANEXO C**

Figura C.1 - Motor de passo magnético permanente em detalhe..... 154

Figura C.2 - Curva característica Torque/Velocidade dos motores de passo da série SM1.8 – NEMA 17..... 155

Figura C.3 - Seleção do motor SM1.8-A1736Q-SE da seria NEMA 17..... 155

Figura C.4 - Esquema da sequência de ligação de motores de passo unipolares e bipolares..... 156

## **ANEXO D**

Figura D.1 – Princípio de funcionamento de: a) *encoder* rotativo, b) *encoder* linear (HIRANO, 2006)..... 158

Figura D.2 - *Encoder Incremental* Hohner da série 75; (a) vista do *encoder*, (b) desenho e medidas técnicas do *encoder* vazado..... 159

Figura D.3 - Sinais gerados e detalhes da ligação das saídas do *Encoder Incremental* Hohner da série 75..... 160

## Lista de Tabelas

### **Capítulo 1**

	Página
Tabela 1.1 – Quadro resumo DENATRAN – Anuário Nacional Estatístico 2000 – 2008 ( <a href="http://www.denatran.gov.br/frota.htm">http://www.denatran.gov.br/frota.htm</a> ).....	7

### **Capítulo 2**

Tabela 2.1 – Resumo dos trabalhos em Navegação por visão por ano de publicação (1979 a 2000) adaptado da Tabela original de Bonin-Font et al. (2008), <i>Indoor-Outdoor</i> .....	29
Tabela 2.2 – Resumo dos trabalhos em Navegação por visão por ano de publicação (1994 a 2006) adaptado da Tabela original de Bonin-Font et al. (2008) <i>Map building-Mapless</i> .....	33
Tabela 2.2 – Resumo dos trabalhos em Navegação por visão por ano de publicação (1994 a 2006) adaptado da Tabela original de Bonin-Font et al. (2008), <i>Map building-Mapless</i> (continuação 1).....	34
Tabela 2.2 – Resumo dos trabalhos em Navegação por visão por ano de publicação (1994 a 2006) adaptado da Tabela original de Bonin-Font et al. (2008), <i>Map building-Mapless</i> (continuação 2).....	35

### **Capítulo 3**

Tabela 3.1 – Configurações para <i>scanners</i> 3D (NUCHTER, 2009), utilizando um <i>scanner</i> SICK, a ser utilizado no presente trabalho.....	59
Tabela 3.2– Especificações técnicas dos sensores SICK da série LMS 2XX (SICK, 2009).....	71

### **Capítulo 4**

Tabela 4.1 – Vantagens e desvantagens das aproximações métricas e topológicas (SICILIANO, 2006).....	78
Tabela 4.2 - Algoritmo Grades de Ocupação, uma versão do filtro binário de Bayes (THRUN et al., 2000).....	86

## **Capítulo 5**

Tabela 5.1 - Resumo das características do escaneamento de uma pessoa (Referência Figura 5.3).....	106
Tabela 5.2 - Resumo de Características do escaneamento da parte superior uma pessoa adulta (Referência Figura 5.4).....	107
Tabela 5.3 - Resumo de Características do escaneamento do Caso I (Referência às Figura 5.5 a 5.12).....	109
Tabela 5.4 - Resumo de Características do escaneamento do Estudo de Caso II (Referência às Figuras 5.13 a 5.17).....	118

## **ANEXO A**

Tabela A.1 - Comandos usados pelo módulo <i>Sb Power Step</i> para o controle dos motores .....	147
---	-----

## **ANEXO D**

Tabela D.1 - Características mecânicas do <i>encoder</i> incremental Hohner série 75 (HOHNER ELETRÔNICA, 2009).....	160
Tabela D.2 - Características elétricas do <i>encoder</i> incremental Hohner série 75 (HOHNER ELETRÔNICA, 2009).....	160

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

### ***Letras Latinas***

- $C$  células dentro do mapa do ambiente;
- $D$  distância para o objeto [m];
- $f$  frequência [Hz];
- $M$  mapa do ambiente [-];
- $m_n$  representação específica de cada característica do ambiente [-];
- $P$  célula de referência no mapa do ambiente;
- $s$  distância [m];
- $t$  tempo [s];
- $v$  velocidade [m/s];
- $X$  primeira coordenada espacial do sistema 3D;
- $x_t$  posições do robô durante a exploração do ambiente;
- $Y$  segunda coordenada espacial do sistema 3D;
- $Z$  terceira coordenada espacial do sistema 3D;
- $z_t$  medições adquiridas pelo sensor no instante t

### ***Letras Gregas***

- $f(\theta)$  função gradiente [%];
- $\alpha$  ângulo de incidência de uma linha (laser) para um objeto [°];
- $\lambda$  comprimento de onda de modulação [nm];

## ***Subscritos***

- n* número de características o ambiente 1, 2.. N;  
*t* instante da medição *z*;  
*i* posição da célula na coordenada *X*;  
*j* posição da célula na coordenada *Y*;  
*k* posição da célula na coordenada *Z*;

## ***Abreviações***

3DLS	3D Laser Scanner;
3D-NDT	Three-Dimensional. Normal. Distributions Transform;
AE	Ambiente estruturado (robótica) (ambiente onde os parâmetros operacionais do robô podem ser identificados e quantificados);
ABS	Anti-lock Breaking System;
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems;
ANC	Área de navegação continua;
ANP	Área de navegação primária;
CAN	Controller Area Network;
CAT	Continuous Appearance-based Trajectory;
CML	Concurrent Mapping and Localization;
DEM	Digital Elevation Maps;
DGPS	Differential Global Positioning System;
EGV	Extended Voronoi Graph;
FOV	Field Of View;
FPGA	Field Programmable Gate Array;
GIS	Geo Information System;
GNSS	Global. Navigation Satellite System;
GO (OG)	Grade de Ocupação (Occupancy Grid);
GO 2C-D	Grades de Ocupação 2D com uma terceira dimensão em cores (Mapa);

GO-3D	Grades de ocupação em 3 dimensões (Mapa 3D);
GOM	Grade de Ocupação Melhorada;
GPS	Global. Positioning System;
GV	Voronoi Graph;
HYMM	Hybrid Metric Map;
IMU	Inertial Measurement Unit;
INS	Inertial Navigation System;
JAUS	Joint Architecture for Unmanned Systems;
KF	Kalman Filter;
K-TLS	Kinematic Laser Scanning;
L	Ponto cardeal leste;
LADAR	Laser Detection and Ranging;
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation;
LIDAR	Light Detection and Ranging / Laser Imaging Detection and Ranging;
LMS	Laser Measurement Systems;
LMS-3D	Laser Measurement Systems in 3D;
MATLAB®	Matrix Laboratory (ferramenta de programação de alto nível para cálculo num.);
MLS-M	Multi-level surface maps;
MVOG	Multi Volume Occupancy Grids;
N	Ponto cardeal norte;
NE	Ponto colateral nordeste;
NO	Ponto colateral noroeste;
O	Ponto cardeal oeste;
PIC	Programmable Interface Controller;
PVO	Probabilistic Velocity Obstacle;
RADAR	Radio Detection and Ranging;
S	Ponto cardeal sul;
SAC	Sistema de Ajuda ao Condutor;
SE	Ponto colateral sudeste;
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping;
SLAM-3D	Simultaneous Localization and Mapping in 3D;

SLAM-SD	Simultaneous Localization and Mapping; in Semi-Dynamic environments;
SO	Ponto colateral sudoeste;
STI	Sistemas de Transporte Inteligente;
SVM	Support Vector Machine;
TOF	Time-Of-Flight;
UAV	Unmanned Aerial Vehicle;
UGV	Unmanned Ground Vehicle;
VFH	Vector Field Histogram;

### *Siglas*

DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency (USA);
DETRAN	Departamento Nacional de Transito (Brasil);
DMC	Departamento de Mecânica Computacional (FEM-UNICAMP-Brasil);
FEM	Faculdade de Engenharia Mecânica (UNICAMP-Brasil);
IAIS	Instituto de análises inteligentes e sistemas da informação (Alemanha);
LMA	Laboratório de Mobilidade Autônoma (DMC-FEM-UNICAMP-Brasil);
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration (USA);
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas (São Paulo – Brasil);

## **Lista de Definições**

*Bayesian*: (Bayesianos) refere-se a métodos em probabilidade e estatística. Nomeado assim em referência a Thomas Bayes (1702-1761), em específico são métodos relacionados com a inferência estatística.

*Benchmark*: avalia e compara o produto de um competidor com o seu próprio produto (de acordo com os padrões vigentes) para que melhorias possam ser feitas;

*Feasibility grids*: Grade (de ocupação) por viabilidade, sendo que a observação pode dividir o objeto ou a ocupação em estática e dinâmica.

*Inertial navigation system (INS)*: Sistema de Navegação Inercial (ou Sistema Inercial), é denominada a navegação que utiliza: i) computador; ii) sensores de movimento (acelerômetros); e sensores de rotação (giroscópios), para calcular continuamente a posição, orientação/direção e velocidade do movimento de um objeto.

*Kalman filter*: é um algoritmo desenvolvido por Rudolf E. Kalman (1930 - presente), também conhecido como *Linear Quadratic Estimation (LQE)*, que utiliza uma série de medições observadas ao longo do tempo (com ruído e imprecisões) para produzir estimativas de variáveis desconhecidas. Tende a ser mais precisa que aquelas baseadas em uma simples medição. Suas aplicações variam desde direção, navegação e controle de veículos até séries de tempo, processamento de sinais e econometria.

*Likelihood*: probabilidade, possibilidade, chance; predisposição.

*Map-based navigation*: navegação baseada em mapas (p.e. métricos, topológicos).

*Mapless navigation*: sistema de navegação sem utilização de mapas.

*Matching*: trata-se de “procurar/seguir” na imagem uma instância de um modelo pré-determinado. Também pode ser entendido como o estabelecimento de correspondências (detecção).

*Rangefinder*: instrumento de medição (acústico e/ou ótico e eletrônico) que serve para encontrar a distância a um determinado objeto.

*Thresholding*: seleção do limiar de separação de uma imagem (ou representação).

# SUMÁRIO

	Página
1	INTRODUÇÃO
1.1	Motivação
1.2	Justificativa
1.3	Contexto
1.3.1	Sistema de Percepção para veículos Semi- e Autônomos
1.3.2	Importância dos Sistemas LIDAR-3D na integração dos Modelos Híbridos
1.3.3	Contexto Institucional: Laboratório de Mobilidade Autônoma (LMA)
1.4	Definição da Problemática
1.5	Objetivos e Organização do Trabalho
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
2.1	Introdução
2.1.1	Navegação Local baseada em Multisensores
2.1.2	Navegação Global baseada em um Modelo Híbrido de Localização
2.2	O Problema da Navegação Autônoma
2.3	Navegação por visão para Sistemas Autônomos Móveis
2.3.1	Navegação por visão: Primeiras técnicas
2.3.1.1	Navegação <i>Indoor</i>
2.3.1.2	Navegação <i>Outdoor</i>
2.3.2	Navegação por visão: evolução até o Presente
2.3.2.1	Sistemas de navegação baseados em mapas
2.3.2.2	Navegação sem mapas
2.4	Sistema de Percepção LIDAR-3D: Estado da Arte
2.5	Mapeamento: Pesquisas relacionadas

3	SISTEMA DE PERCEPÇÃO LIDAR-3D	52
3.1	Princípios de funcionamento da Percepção LIDAR em 3D	53
3.1.1	Medições por tempo de vôo ( <i>Time of flight</i> )	53
3.1.2	Medições por comparação de fase ( <i>phase-shift</i> )	54
3.1.3	Triangulação	56
3.2	<i>Scanner</i> a Laser	57
3.2.1	<i>Scanner</i> a laser 2D	58
3.2.2	<i>Scanner</i> a laser 3D	58
3.3.3	<i>Scanner</i> de projeção 3D	60
3.2.4	Aplicações do <i>Scanner</i> a laser 3D	61
3.3	LIDAR-3D nos Sistemas Moveis (Semi)- Autônomos	64
3.3.1	Modelagem do ambiente utilizando LIDAR 3D	65
3.4	Proposta para o desenvolvimento do Módulo LMS-3D	66
3.5	Seleção dos Materiais	68
3.6	<i>Scanner</i> de Medição a Laser LMS-291 05	70
3.7	Implementação da Interface	72
3.7.1	<i>Toolbox</i> Sick LIDAR Matlab/C++	72
3.8	Protótipo do <i>Scanner</i> de Medição a Laser 3D (LMS-3D)	74
4	MAPAS TELEMÉTRICOS	76
4.1	Introdução	76
4.2	Mapeamento	79
4.3	Mapeamento baseado em Grades de Ocupação	81
4.3.1	Algoritmo padrão do mapeamento baseado em GO	85
4.4	Mapeamento com representação espacial baseada em GO	87
4.4.1	Mapa baseado em grades de ocupação em duas dimensões com uma terceira dimensão representada de forma colorida (Mapa GO-2C-D)	87
4.4.2	Mapa baseado em grades de ocupação em três dimensões (Mapa GO-3D)	90
4.5	Mapeamento baseado em Mapas Vetoriais	92
4.5.1	Mapas vectoriais baseados em gradientes: Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste	93

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	99
5.1	Preâmbulo: Problemática	99
5.2	Sistema de Percepção LMS-3D	101
5.2.1	Características do Protótipo sistema LMS-3D	102
5.3	Experimentos e resultados utilizando o Sistema de Percepção LMS-3D	105
5.3.1	ESTUDO DE CASO I: Representação sensorial e mapeamento por grades de ocupação (GO-2C-D e GO-3D) e gradiente de vetores (Mapa Vetorial) de um ambiente <i>indoor</i> com obstáculos estáticos, abordando o problemas de oclusão (paredes paralelas)	109
5.3.2	ESTUDO DE CASO II: Representação sensorial e mapeamento utilizando grades de ocupação (GO-2C-D e GO-3D) e gradientes vetoriais de ambientes <i>indoor</i> com rampas	118
5.3.3	ESTUDO DE CASO III: Representação sensorial e mapeamento por grades de ocupação (GO-2C-D e GO-3D) e gradientes vetoriais de um ambiente <i>indoor</i> com degraus	124
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	128
6.1	Trabalhos futuros	132
	Referências	133
	ANEXO A - Módulo “ <i>Sb Power Step</i>	146
	ANEXO B - Módulo para desenvolvimento “ <i>Sb Powerboard</i> ”	149
	ANEXO C - Motor de Passo	153
	ANEXO D - <i>Encoder</i>	157
	ANEXO E - Programas em MATLAB	161

# **1 INTRODUÇÃO**

A presente tese aborda o problema da percepção aplicada à navegação de sistemas robóticos (semi)-autônomos, em ambientes externos ou internos, estruturados ou não, baseada na utilização de mapas gerados a partir de sensores telemétricos. Neste sentido, uma plataforma de escaneamento em três dimensões utilizando um laser, denominada de LMS-3D (do inglês *Laser Measurement Systems in 3D*), foi desenvolvida e utilizada para gerar mapas determinísticos. Neste primeiro capítulo serão introduzidos os primeiros conceitos relacionados à motivação, justificativa e contexto na qual está inserida esta pesquisa. Por último, será apresentada a problemática e os objetivos propostos.

## **1.1 Motivação**

Mapas desenvolvem papel importante na problemática da navegação de sistemas robóticos, podendo ser definidos, de forma geral, como um conjunto de lugares com características simples, construídos e relacionados a partir da capacidade sensorial (percepção), e conectados por ações ou acontecimentos. Entretanto, para humanos é muito mais complexo o entendimento do processamento da informação observada envolvida na navegação em um determinado cenário (VALE, 2005). Pesquisadores da área cognitiva têm sugerido que os humanos utilizam mapas cognitivos para conectar marcas (*landmarks*) associadas. Estas marcas (por exemplo: ruas, prédios, estações, parques, jardins, rios, etc), que são referências comuns e compreensíveis para um determinado ser humano, são, posteriormente, conectadas por rotas. Este tipo de mapa é conhecido como mapa topológico (Figura 1.1). Segundo Vale (2005), um dos mais ambiciosos alvos da pesquisa em robótica é o desenvolvimento de uma estratégia de navegação autônoma para robôs em ambientes externos, similares aos cenários nos quais os animais sobrevivem. Para isto, é necessário aprofundar, em um primeiro momento, o entendimento e aplicação dos sistemas de percepção capazes de solucionar, de forma simples, o problema da navegação.

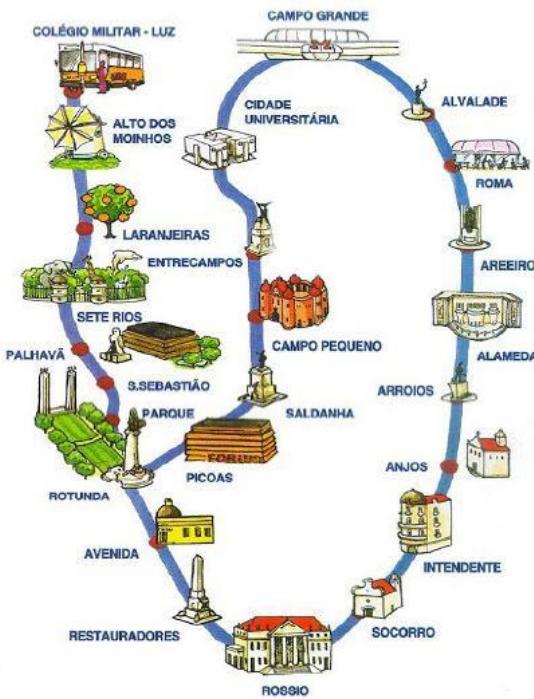


Figura 1.1 – Mapa humano, ilustração da representação de um exemplo de mapa topológico do metrô de Lisboa, com todas as estações identificadas por prédios particulares ou outras características/marcas importantes (VALE, 2005).

Olhando para a natureza, podem-se observar diversos exemplos cotidianos associados à navegação (de animais) em um determinado ambiente (natureza). A capacidade de orientação e navegação é requisito indispensável para sobrevivência no planeta. Neste âmbito, pode-se destacar o comportamento de formigas, abelhas e pássaros em migração. Assim, sistemas de navegação podem ser estudados a partir do conhecimento comportamental de animais e humanos, que são a base da chamada inteligência artificial (AI) (ALVAREZ-JÁCOBO et al., 2009).

A *Biomimesis*, combinação das palavras gregas *bio* (vida) e *mímesis* (imitação), é uma área da ciência que observa e estuda as estruturas biológicas e suas funções, com o intuito de aprender com a natureza e aplicar tal conhecimento à solução de diferentes problemas humanos. Na área da engenharia, a bio-inspiração é muito utilizada. No caso das formigas, as técnicas utilizadas nas colônias são estudadas tanto em informática como em robótica, influenciando a construção de lógicas aplicadas a sistemas distribuídos, tolerância a falhas, motores para pesquisa baseados na

“procura por rastros”, algoritmos de rede (DICKE et al., 2004), estudos sobre locomoção, táticas militares para veículos não tripulados (baseados em algoritmos de feromônios e de *swarming*) (ARQUILLA; RONFELDT, 2000), etc. Existem ainda muitas outras pesquisas não listadas e inúmeras para serem descobertas neste campo da bio-inspiração.

Existem aproximadamente 20.000 diferentes espécies de formigas. É interessante observar a evolução do “sistema de percepção” destes animais. Em especial, chama-se a atenção para a análise da formiga *bulldog*, ou gigante australiana (gênero *Myrmecia*), a qual possui um comportamento social pouco evoluído: caçam sozinhas e utilizam predominantemente seus olhos para encontrar suas presas, ao invés dos outros sentidos mais apurados, como por exemplo os sentidos químicos (p.e. olfativos). Por outro lado, a formiga do deserto *Cataglyphis fortis*, mais evoluída, possui um curioso sistema de navegação, adaptação e sobrevivência. Apesar de seu tamanho milimétrico e de viver no inóspito deserto do Saara (Tunísia), estas formigas andam aleatoriamente pela areia à procura de comida, às vezes, em trajetos desconhecidos, e ao encontrarem alimento, voltam caminhando quase que em linha reta em direção ao seu ninho (MULHER; WEHNER, 1988). Para melhor visualização da magnitude do problema, pode-se observar, na Figura 1.2a, a rota percorrida por uma destas formigas desde o seu ninho (N) até a comida (F): o caminho de ida em traço contínuo e o caminho de volta em tracejado. Neste caso, a formiga percorreu cerca de 354 metros em aproximadamente 28 minutos, sendo 22 minutos para encontrar a comida e apenas 6 minutos para voltar ao ninho. Como fez isso? Para calcular o caminho de volta ao seu ninho (N), a *Cataglyphis fortis* se baseia principalmente na percepção: ângulo em relação ao Sol e distância percorrida (odometria).

Para determinar a direção na qual a *Cataglyphis fortis* caminha, ela possui um sistema denominado “bússola celestial”, não utilizando a posição do Sol como referência, mas a polaridade da luz que chega do céu, a qual é sempre perpendicular aos raios da luz do Sol. Os insetos conseguem distinguir esta polaridade utilizando estruturas sensíveis à luz, chamadas de “ocelos”. Integrando estes dois sistemas, as formigas *Cataglyphis fortis* conseguem estimar a direção a ser percorrida. Este cálculo é suficiente para fazê-la retornar a um local próximo o suficiente da entrada de seu ninho. O cérebro desta formiga está equipado com um sistema de

navegação que utiliza *landmarks*, as quais não são somente visuais, mas olfativas (STECK et al., 2009). Recentes pesquisas revelaram que estes animais, além de utilizarem uma fonte de odor para sua navegação, podem memorizar e utilizar a distribuição de vários odores diferentes para criar mapas topológicos (STECK et al., 2010).

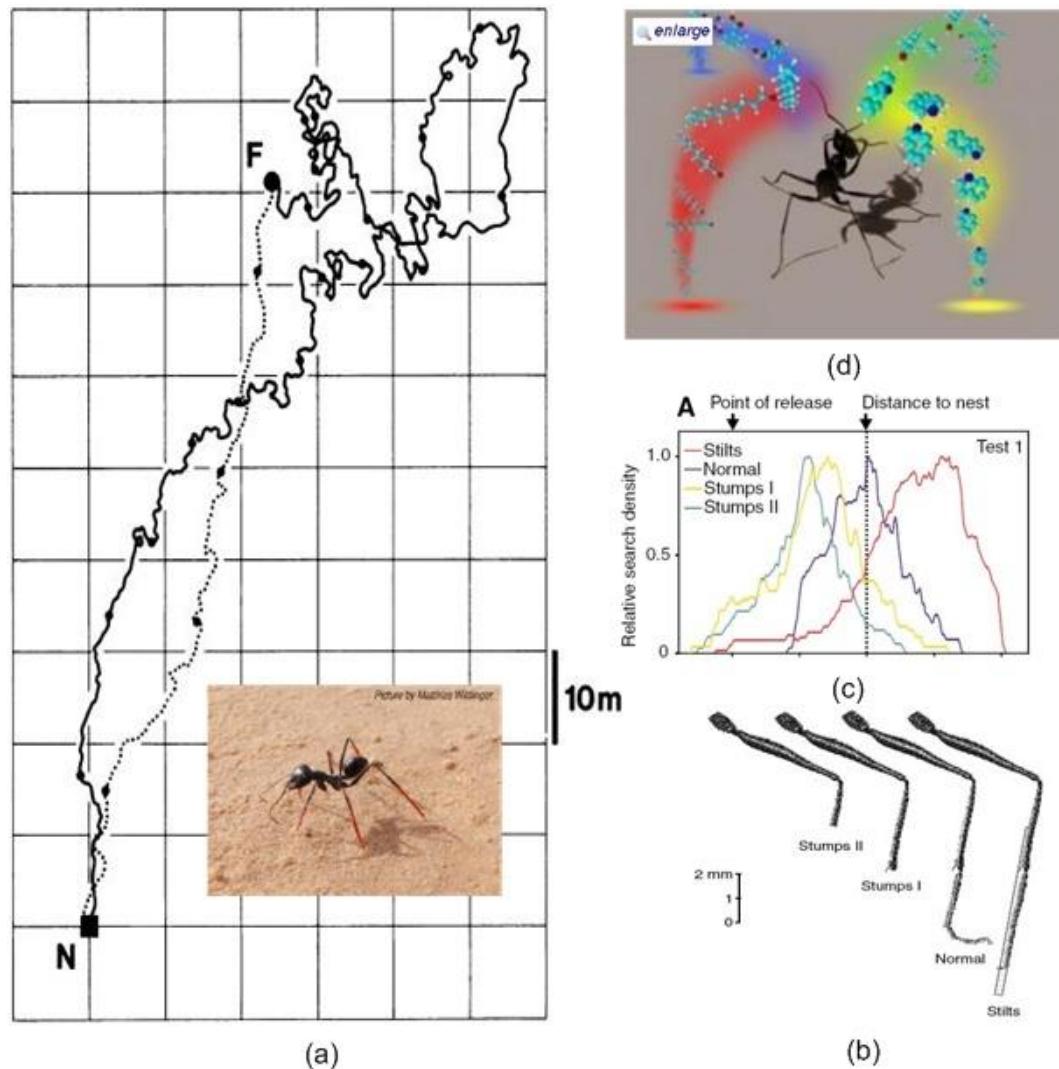


Figura 1.2 - Comportamento da formiga *Cataglyphis fortis* navegando no deserto: (a) Mapa métrico e rota (MULHER; WEHNER, 1988); (b) Detalhe do tamanho das patas de formiga; (c) Distâncias percorridas no experimento com variação do passo (WITTLINGER, 2007); (d) Navegação olfativa espacial, “olfato estéreo” (MAX PLANCK INSTITUTE FOR CHEMICAL ECOLOGY, 2010).

A evolução propõe, no caso das formigas, a utilização de outros sensores aparentemente desnecessários (p.e. olfativos em estéreo) para se ter uma “imagem” do mundo real. Esta percepção, resumida em um mapa, deverá satisfazer as necessidades intrínsecas ao problema de navegação específico, e não lógicas definidas como inteligentes. Sendo assim, é importante definir que o único requisito associado à utilização de sensores espaciais é a própria problemática a ser resolvida. A evolução do sistema de percepção da formiga, de visão estéreo para visão olfativa espacial, mostra um caminho alternativo para as propostas dos sistemas de percepção adotados nos sistemas robóticos. Seguindo esta lógica, o sistema LIDAR 3D (*Light Detection And Ranging in 3 Dimensions*) foi escolhido como base do desenvolvimento de um sistema de percepção no presente trabalho, devido a uma série de vantagens (melhor evidenciadas nos próximos capítulos) e principalmente para o estudo de formas eficientes de aplicação deste recurso, visando à navegação dos sistemas robóticos autônomos.

## 1.2 Justificativa

Robótica Móvel é uma área multidisciplinar de grande importância e de futuro promissor. Inúmeras aplicações podem ser encontradas na literatura, dentre elas, quatro frentes têm impulsionado a pesquisa de navegação em ambientes considerados desconhecidos (MIRANDA NETO, 2011b). A primeira é a da exploração espacial. A segunda, de extrema importância, trata de veículos autônomos aplicados à segurança pública e aplicações militares, sendo desenvolvida principalmente pelos EUA, por meio da agência DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*), cuja missão principal é prover as forças armadas de tecnologia suficientemente inovadora, a fim de manter sua superioridade tecnológica. A terceira frente pode ser considerada uma subdivisão da segunda, e diz respeito à aplicação da robótica móvel na agricultura. A quarta frente, apoiada pelas montadoras de veículos e seus fornecedores, tem o objetivo de criar sistemas de auxílio ao condutor, denominados ADAS (do inglês, *Advanced Driver Assistance Systems*) (GIETELINK, 2006). Pode-se também, nesta última linha, inserir as pesquisas relacionadas com os Sistemas de Transporte Inteligente (STI), que incluem a interação com vias inteligentes.

No Brasil, a temática de veículos terrestres em ambientes externos é desenvolvida, em muitos casos, de forma descentralizada em Universidades e centros de pesquisa. Além dos trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Mobilidade Autônoma (LMA) da UNICAMP, destacam-se: Projeto VERO (BUENO et al., 2009; DE PAIVA et al., 2010); Projeto CADU (CADU-UFMG; 2010); UNIFEI em Itajubá/MG; e Projeto CaRINA do Laboratório de Robótica Móvel da USP em São Carlos/SP. Empresas começam a se estruturar, focando inicialmente os sistemas robóticos tele-operados. No entanto, tais empresas objetivam a evolução para soluções autônomas, que representam um diferencial tecnológico a ser alcançado (MIRANDA NETO, 2011b).

No exterior, como apresentado anteriormente, resultados significativos foram obtidos a partir de diretrizes governamentais dos EUA. Em 2005, um desafio conhecido como *Grand Challenge*, permitiu a travessia do deserto de Mojave pela equipe da Universidade de Stanford, *Stanford Racing*, que completou a prova com uma velocidade média de 30,7 km/h (THRUN, 2006). O último desafio ocorreu em novembro de 2007. Conhecido como *DARPA Urban Challenge* (TEAM BERLIN, 2007), caracterizou-se por veículos autônomos que administraram suas missões em uma falsa área urbana. Foram trinta e cinco equipes semifinalistas e onze finalistas. As três primeiras colocações foram conquistadas por equipes americanas. Em primeiro lugar ficou a equipe *Tartan Racing* de Pittsburgh, PA; o segundo lugar, com a equipe *Stanford Racing* de Stanford, CA e o terceiro lugar com a equipe *Victor Tango*, Blacksburg, VA. Com este desafio foi possível testar a habilidade de veículos operarem em um falso ambiente urbano, de maneira segura e efetiva, interagindo com outros veículos e obstáculos, o que condiz com as pesquisas sobre veículos inteligentes.

Por outro lado, pesquisas sobre fatores humanos (*human-factors*) têm-se fundido com a investigação de veículos inteligentes, objetivando criar a nova geração de Sistemas (Avançados) de Assistência ao Condutor (ADAS), que ultrapassam o controle automatizado, a fim de trabalhar em harmonia com um operador humano (McCALL & TRIVEDI, 2006). Investimentos em ADAS interessam a governos e também às indústrias, devido ao grande número de acidentes (MIRANDA NETO, 2011b).

Tabela 1.1 – Quadro resumo DENATRAN – Anuário Nacional Estatístico 2000 – 2008  
[\(http://www.denatran.gov.br/frota.htm\)](http://www.denatran.gov.br/frota.htm)

ITENS	QUADRO 45 - RESUMO DE ANOS ANTERIORES - BRASIL								
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
População	169.590.693	172.385.826	174.632.960	176.871.437	181.581.024	184.184.264	186.770.562	189.612.814	191.480.630
Frota	29.503.503 ***	31.913.003	34.284.967	36.658.501	39.240.875	42.071.961	45.370.640	49.644.025	54.506.661
Acidentes com Vítimas	286.994 **	307.287	251.876	333.689	348.583	383.371	320.333	376.995	428.970
Vítimas Fatais	20.049	20.039	18.877'	22.629	25.526	26.409	19.752	23.286	33.996
Vítimas Não Fatais	358.762 **	374.557 **	318313"	439.065	474.244	513.510	404.385	484.900	619.831
Veículos/100 Habitantes	17,4	18,5	19,6	20,7	21,6	22,8	24,3	26,2	28,5
Vítimas Fatais/100.000 Habitantes	11,8	11,6	12,3"	12,8	14,1	14,3	10,6	12,3	17,8
Vítimas Fatais/10.000 Veículos	6,8	6,3	6,2"	6,2	6,5	6,3	4,4	4,7	6,2
Vítimas Não Fatais/10.000 Veículos	124,1 **	119,8 **	104,6"	119,8	120,9	122,1	89,1	97,7	113,7
Acidentes com Vítimas/10.000 Veículos	99,3 **	96,2	75,1'	91,0	88,8	91,1	70,6	75,8	78,7

Fonte: Detrans/RENAEST

Vide Guia Observações Estatísticas

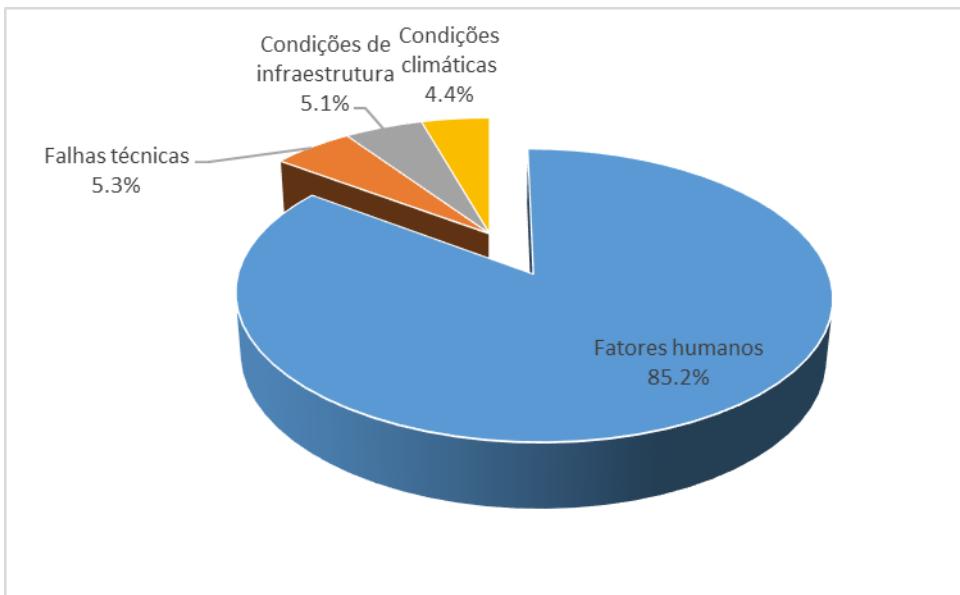


Figura 1.3 - Principais causas de acidentes de trânsito em rodovias, adaptado de IRU (2007).

Uma demonstração disso é que somente no ano de 2008, no Brasil, morreram quase 34 mil pessoas e outras 428 mil ficaram feridas, vítimas de acidente de trânsito, de acordo com os dados do DENATRAN (Tabela 1.1). Uma aproximação modesta do custo econômico desses acidentes para o Brasil ultrapassaria os 10 bilhões de dólares. O NHTSA (*National Highway Traffic Safety*

*Administration U.S.)* calculou que nos EUA, no ano 2005, 43 mil pessoas morreram em 2,7 milhões de acidentes, a um custo aproximado de 230 bilhões de dólares (BUEHLER et al., 2009 – livro DARPA). Em um estudo realizado pelo *International Road Transport Union* (IRU, 2007), intitulado *European Truck Accident Causation*, foram analisados 624 acidentes na Europa, com pelo menos uma vítima, envolvendo caminhões, e revelou que 85,2% deles foram causados por falhas humanas. Sendo 75% destes acidentes causados não por falhas dos caminhoneiros, mas pelos demais usuários de veículos e pedestres. A Figura 1.3 apresenta alguns fatores causadores dos acidentes.

### 1.3 Contexto

Em uma visão global, e como apresentado na Figura 1.4a, os sistemas semi- e autônomos possuem três camadas principais: Percepção, Navegação e Controle. De acordo com Thrun et al. (2006), estes sistemas também podem ser organizados em cinco principais grupos funcionais: Interface com Sensores, Percepção, Controle, Interface com o Veículo e Interface com o Usuário. De acordo com Team Oshkosh (2011), este tipo de arquitetura facilita a separação de funções e desenvolvimento, permitindo a definição de interfaces entre os diferentes subsistemas (MIRANDA NETO, 2011a).

Na Figura 1.4b, apresenta-se um resumo mais abrangente para estes subsistemas. As camadas são denominadas conforme suas funcionalidades: Sensores, Percepção, Mapeamento, Navegação&Controle, Atuadores. Os módulos da Interface Sensores-Percepção e Interface Navegação&Controle-Atuadores (assim como a Interface com o Usuário), não foram evidenciados por se entender que são intrínsecas a cada problema. A presente tese de doutorado está inserida dentro do contexto da camada de percepção do ambiente proposta por MIRANDA NETO (2011a), e que pode ser melhor entendida a partir das tarefas específicas a serem executadas, abrangendo os seguintes sub-sistemas: Sensores, Interface Sensores-Percepção, Percepção e Mapeamento (triângulo verde da Figura 1.4b). No desenvolvimento desta tese, procurou-se resultados significativos que validem a utilização de sistemas tipo LIDAR 3D para o problema da navegação.

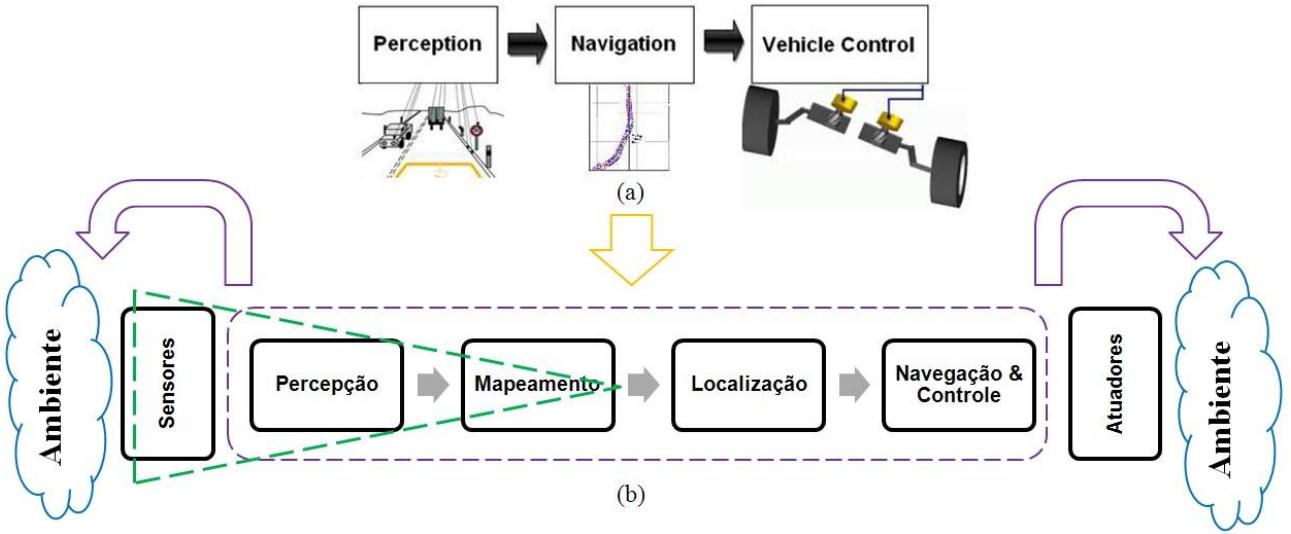


Figura 1.4 - Visualização abstrata das camadas principais dos sistemas semi- e autônomos: (a) simplificada (MIRANDA NETO, 2011a); e (b) por tarefas específicas executáveis. As camadas de interface entre Percepção-Sensores e Navegação&Controle-Atuadores, são consideradas intrínsecas.

### 1.3.1 Sistemas de Percepção para veículos Semi- e Autônomos

Presentes na maioria dos sistemas de Percepção, câmeras são sensores passivos cada vez mais usados em ADAS, seja para o monitoramento de ponto cego, gerando alertas de mudança de faixa; para os sinais de limite de velocidade ou para o reconhecimento de pedestres. O amplo espectro funcional oferecido por este tipo de sensor o faz bastante atraente, pois fornece informações ricas e complementares, substituindo sensores embarcados ou fornecendo redundância em aplicações de segurança. Neste contexto, um aspecto importante para este tipo de aplicação consiste em determinar as velocidades relativas de um veículo com respeito a objetos ou obstáculos (sejam veículos, pedestres etc), a fim de determinar o risco de colisão. Em geral, sensores tipo LIDAR, radar ou sonar medem a distância e a direção de um obstáculo. De acordo com Rodríguez Flórez (2010), lasers constituem uma promissora tecnologia, que permitem acesso a medições precisas e incluem a geometria da cena de maneira confiável, inclusive em condições de mau tempo. A interação entre LIDAR e câmeras é favorável para a melhoria dos

sistemas LIDAR existentes, os quais são baseados em rastreamento de múltiplos alvos. Sistemas de Percepção Multisensores desempenham um importante papel e representam a principal entrada para sistemas de controle de veículos autônomos (MIRANDA NETO, 2011b).



Figura 1.5 - Espaço Navegável: (a) Sistema Multisensor Laser / Visão (DAHLKAMP, 2006); (b) Sistema baseado em Visão (ÁLVAREZ & LOPEZ, 2011).

Como apresentado na Figura 1.5, e de acordo com MIRANDA NETO, (2011b), o espaço navegável local (*Driveable Space*) representa a região onde um veículo ou robô pode executar sua trajetória de maneira segura (ÁLVAREZ & LOPEZ, 2011; DAHLKAMP, 2006). Uma forma complementar para a obtenção do espaço navegável consiste na detecção de obstáculos e das marcações de trânsito. Baseado em um modelo de visão monocular, e em informações proprioceptivas do veículo, a Figura 1.6 apresenta um sistema comercial conhecido como *Mobileye*, que representa atualmente o estado da arte em termos de sistemas automotivos de visão computacional, amplamente adotado pela indústria. Trata-se de uma solução de segurança para prevenção e mitigação de colisão. Este sistema é composto por uma câmera (resolução VGA) acoplada atrás do pára-brisa do carro, na altura do retrovisor. As informações 3D fornecidas pelo sistema *Mobileye* são muito confiáveis, incluindo o processamento de imagem avançado para detecção e rastreamento de objetos (pedestres, ciclistas, motos, carros, caminhões, marcações e sinalizações de trânsito, etc).

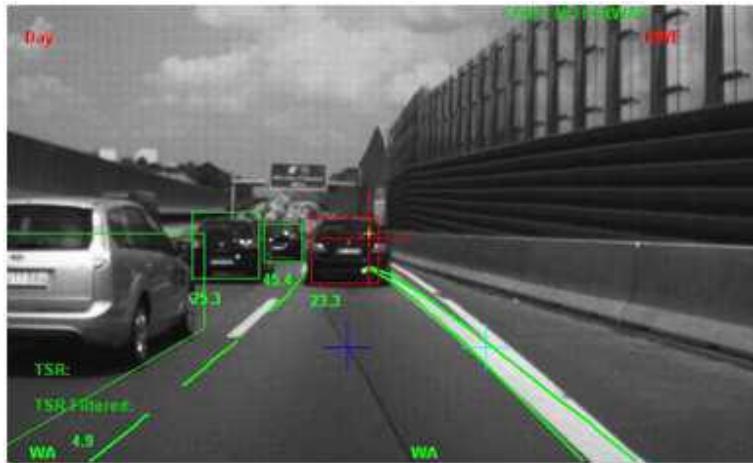


Figura 1.6 - Sistema Comercial *Mobileye* (Monocular).

A representação do espaço navegável na literatura é apresentada a partir de diferentes técnicas, dentre elas, grades de ocupação (THRUN, 2006). Este modelo permite a cartografia do ambiente. A ideia é permitir que um veículo se desloque em um ambiente desconhecido e crie a representação deste meio segundo o princípio de acumulação. Quanto mais o sistema detecta um objeto durante o deslocamento, maior a probabilidade de ocupação de uma célula correspondente. Contudo, um estudo deve prever cenas dinâmicas, nas quais os alvos/objetos podem estar em movimento. Na Figura 1.7 podem ser verificados resultados iniciais obtidos em Compiegne, na França (MIRANDA NETO, 2011b).

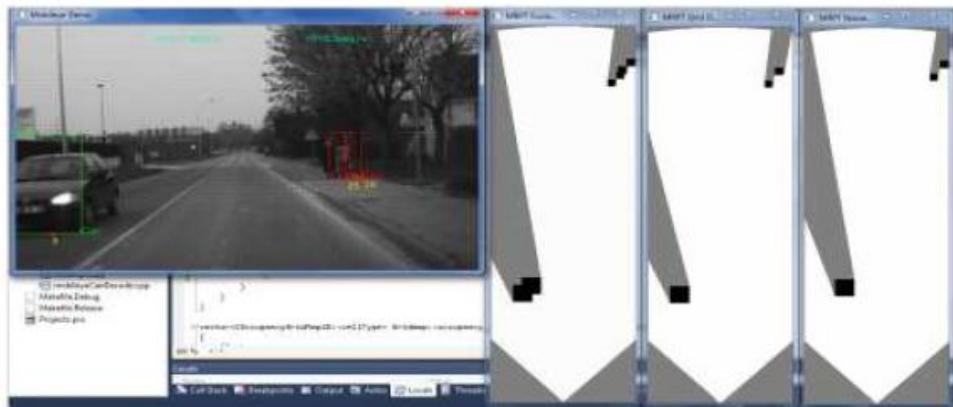


Figura 1.7 - Resultados da fusão de grades de ocupação tipo pessimista, em ambiente dinâmico, a partir de dados obtidos por uma câmera *Mobileye*.

### 1.3.2 Importância dos Sistemas LIDAR-3D na integração dos Modelos Híbridos

De acordo com (MIRANDA NETO, 2011b), a navegação de veículos autônomos em ambientes urbanos dinâmicos exige necessariamente uma precisão superior, a fim de permitir o desvio de obstáculos detectados (incluindo pedestres e veículos). Sistemas baseados em LIDAR, GPS e IMU podem gerar um mapa de alta-resolução do ambiente e, juntos, serem utilizados para a tarefa de navegação (LEVINSON & THRUN, 2010; HIMMELSBACH et al., 2009). No sensor *HDL-64E LiDAR* da marca *Velodyne*; (detalhe da sua aplicação na Figura 1.8), 64 feixes de lasers mapeiam o ambiente a 360° no plano horizontal e 26,8° no plano vertical. A unidade pode girar até a 900 rpm (15 Hz), chegando a acumular até 1,3 milhões de pontos por segundo, com um alcance máximo de 50 m (quando o pavimento tem refletividade aproximada de 0,1), fornecendo, desta forma, uma visualização 3D do ambiente (VELODYNE, 2013).

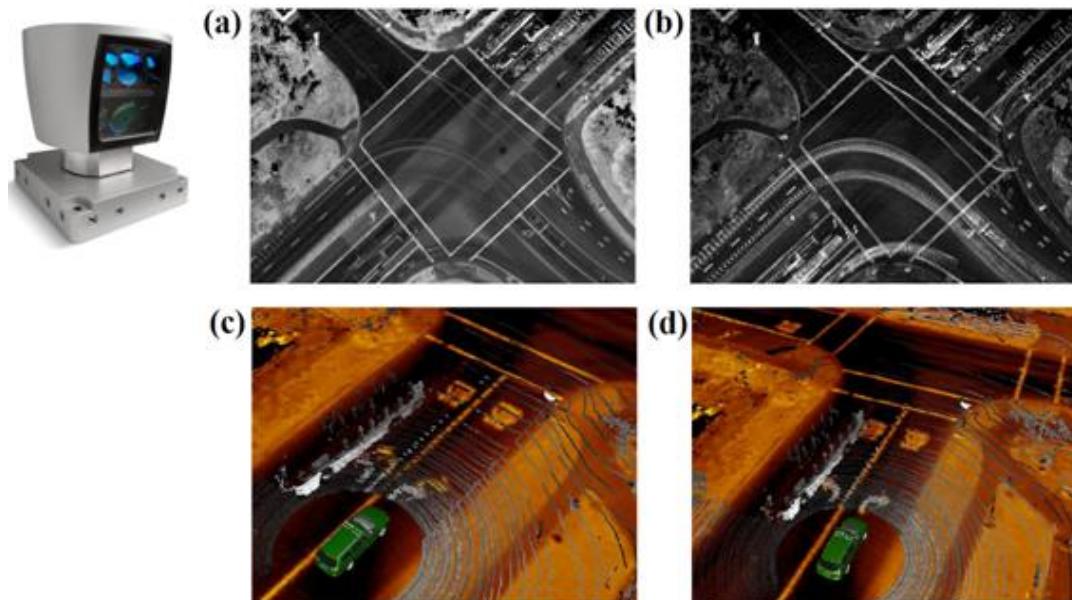


Figura 1.8 – *HDL-64E Velodyne* (a) Média da refletividade em infravermelho; (b) Desvio padrão dos valores de refletividade infravermelha; (c) a localização GPS induz um metro de erro; (d) Nenhum erro perceptível após localização (LEVINSON & THRUN, 2010).

Baseado nas informações apresentadas nas seções anteriores, um sensor do tipo LIDAR-3D foi desenvolvido com a finalidade de: (i) propiciar um nível mais elevado de Percepção do Ambiente; (ii) contribuir para o quesito segurança nos deslocamentos semi- ou autônomos, sobretudo naqueles em que pedestres e veículos circulam livremente; (iii) viabilizar o estudo de modelos de sistemas de sensores telemétricos de menor custo.

Sistemas como o *Velodyne HD-LIDAR* representam o "estado da arte" em termos de mapeamento 3D em tempo real, tendo sido amplamente usados na competição em ambiente semi-urbano organizada pelo DARPA, nos Estados Unidos (*Urban Challenge*). Atualmente, destaca-se o trabalho de cartografia realizado pela Google na geração de mapas 3D - *Google's Prius* (MIRANDA NETO, 2011b).

### **1.3.3 Contexto Institucional: Laboratório de Mobilidade Autônoma (LMA)**

Nas políticas de desenvolvimento do Estado Brasileiro, considera-se que o Estado tem por missão operar no teto tecnológico, desenvolvendo as tecnologias que as empresas privadas não podem alcançar ou obter a curto ou médio prazo, de maneira rentável (Estratégia Nacional de Defesa, Ministério da Defesa, Brasil, 2<sup>a</sup> edição e Plano de Ação para o período 2007-2010 do Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasil), e dentre as diretrizes de incentivo para pesquisa científica na área de Defesa Nacional no Brasil, destacam-se: Fusão de Dados, Inteligência de Máquinas & Robótica e Integração de Sistemas (MIRANDA NETO, 2011b).

Em conformidade com as áreas de pesquisa básica, e em observância às questões de interesse do Estado Brasileiro, especialmente nas que concernem ao desenvolvimento de aplicações voltadas à mobilidade de veículos autônomos ou semi-autônomos, foi criado em 2008 o Laboratório de Mobilidade Autônoma (LMA), sediado no Departamento de Mecânica Computacional da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da UNICAMP. Sua efetivação, entretanto, tornou-se possível graças à aprovação do projeto do Ministério da Defesa/CAPES, Pró-Defesa 2008, intitulado “Desenvolvimento de uma Plataforma Robótica para Estudos de Mobilidade Terrestre (Semi)-Autônoma” que envolve também o Departamento de Telecomunicações e Controle da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) e o

Laboratório de Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais do Instituto Militar de Engenharia (IME) (MIRANDA NETO, 2011b).

Neste contexto, o presente trabalho contribuiu para sistemas de percepção, e serviu de base para outros dois trabalhos de iniciação científica (IC): (i) Fusão da monovisão com laser SICK para modelagem de ambiente computacional 3D; (ii) Sistema de medição e controle de distância frontal baseado na fusão entre câmera digital e apontador laser, utilização de marcas externas para o cálculo de profundidade em monovisão.

## 1.4 Definição da Problemática

A Percepção do ambiente é uma tarefa essencial e para isso usa diferentes tipos de sensores, incluindo sensores ultra-sônicos, lasers, radares, câmeras, etc. Como destacado anteriormente, Sistemas de Visão têm sido projetados para investigar as informações do ambiente. Estes sensores passivos têm sido amplamente usados nos sistemas ADAS (MIRANDA NETO, 2011a). No caso das câmeras, o amplo espectro funcional oferecido por este tipo de sensor o faz bastante atraente, pois fornece informações ricas e complementares, substituindo sensores embarcados ou fornecendo redundância em aplicações de segurança (RODRÍGUEZ FLÓREZ, 2010).

Entretanto, a fim de determinar as velocidades relativas, por exemplo, entre veículos, em geral, sensores como LIDAR permitem medições diretas e precisas, e podem incluir a geometria da cena de maneira confiável, inclusive em condições de mau tempo. A interação entre LIDAR e câmeras representa algo favorável para a melhoria dos sistemas LIDAR existentes baseados em rastreamento de múltiplos alvos (MIRANDA NETO, 2011b). A inclusão deste tipo de solução de mapeamento 3D aumenta a robustez do sistema, e por outro lado, sobre limitações da visão monocular, melhorando o sensoriamento em ambientes, por exemplo, com superfícies paralelas, rampas, etc; por incluir a noção de profundidade.

A probabilidade na robótica móvel está relacionada principalmente com as etapas de percepção e decisão (ação), sendo uma ferramenta útil na hora de representar informações e tomar decisões (OCHOA-DIAZ, 2010). Especificamente, a robótica probabilística tenta representar os erros aleatórios (incertezas) determinados nas condições do ambiente. Este erro afeta o conhecimento do robô em relação ao seu ambiente, bem como os estados internos do mesmo. A utilização de modelos probabilísticos é uma alternativa para modelar estas informações.

Desta forma, o presente trabalho apresenta o estudo e desenvolvimento de um sistema de percepção, baseado em sensores telemétricos tipo LIDAR, a fim de perceber o ambiente, desenvolver uma interface com o sistema, reconstruir o ambiente em um mapa sensorial de nuvens de pontos (3D) e, a partir de técnicas específicas, consolidar estes dados em diferentes mapas (locais), a fim de facilitar a percepção de áreas de navegação. Em síntese, o presente trabalho abrange os seguintes problemas:

- i) Sensoriamento do ambiente 3D a partir de um sistema LIDAR;
- ii) Detecção de obstáculos no espaço (3D) do sensor;
- iii) Detecção de superfícies contínuas e descontínuas: a fim de contemplar o problema de oclusão e calcular a disparidade, principalmente em casos como: paredes paralelas descontínuas, escadas, rampas, etc;
- iv) Modelamento do ambiente em mapas (determinísticos) locais;
- v) Construção de mapas de reconhecimento de áreas (superfícies contínuas e com gradientes) de navegação.

Consequentemente, as camadas (ou subsistemas) atingidas dentro desta proposta são: Sensoriamento, (Interface Sensor-Percepção), Percepção e Mapeamento.

## **1.5 Objetivos e Organização do Trabalho**

Alinhado aos objetivos do Projeto *Desenvolvimento de uma Plataforma Robótica para Estudos de Mobilidade Terrestre (Semi)-Autônoma*, e do Laboratório de Mobilidade Autônoma (LMA), definiram-se os seguintes objetivos:

1. Desenvolvimento e implementação de um Sistema de Percepção LIDAR 3D, denominado de LMS-3D, utilizando um sensor *scanner* LMS 291 SICK (subsistema-camada de sensoriamento);
2. Desenvolvimento de um *software* de aquisição, controle e pré-processamento de dados obtidos com a plataforma LMS-3D (subsistema-camada de interface sensor-percepção e subsistema-camada de percepção);
3. Desenvolvimento de algoritmos para geração de mapas locais: (i) Mapas sensoriais; (ii) Mapas de grades de ocupação 2D com uma terceira dimensão em cores (GO 2C-D); (iii) Mapas de ocupação espacial (GO-3D), (iv) Mapas de gradientes vetoriais visando a navegação de um veículo terrestre (subsistema-camada mapeamento);
4. Validação experimental da Plataforma LMS-3D para os problemas específicos: (1) Detecção de obstáculos no espaço do sensor; (2) Geração de mapas de disparidade nos ambientes 3D; e (3) Identificação de gradientes no piso do ambiente visando a percepção de uma área contínua passível de navegação.

No campo da aplicação, será também estudada a utilização de um sensor a LASER, em suas diferentes configurações (LIDAR e LIDAR 3D), visando a fusão com sensores de visão computacional, a fim de favorecer a Navegação de Sistemas Móveis.

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos. No capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica bem abrangente, reforçando alguns conceitos importantes e apresentando o estado da arte dos sistemas de percepção por visão. No capítulo 3 é apresentado o estudo e desenvolvimento da Plataforma LIDAR-3D, princípio de funcionamento, construção, interface e utilização. No capítulo 4 são introduzidos os modelos de representação do ambiente (mapas) que foram escolhidos, e apresentadas as metodologias adotadas para a criação dos mapas que utilizam grades de ocupação e gradientes vetoriais. No capítulo 5 são apresentados os casos de estudo propostos experimentalmente, seus resultados e discussões. Por último, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões e sugeridos trabalhos futuros.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O presente capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dos principais aspectos que envolvem o estudo dos sistemas de navegação (semi-) autônoma: (i) primeiro uma introdução com os principais conceitos; (ii) estado da arte dos sistemas de navegação baseados em visão; (iii) estado da arte dos sistemas de mapeamento 3D, principalmente aqueles que utilizam LIDAR; (iv) estado da arte dos mapas telemétricos, em específico aqueles baseadas nas grades de ocupação.

### **2.1 Introdução**

Auxiliar humanos, a partir de sistemas automatizados, semi-autônomos e autônomos é uma tendência decorrente da evolução tecnológica. Entretanto, no cumprimento de tarefas para deslocamentos em área urbana, por exemplo, o ambiente é uma variável de grande impacto e importância. Mesmo que um ambiente seja previamente mapeado por um sistema de posicionamento global, a aleatoriedade e reposicionamentos constantes no decorrer do tempo, o descaracterizam parcial ou totalmente (MIRANDA NETO, 2008).

Na justificativa desta proposta ressaltou-se a importância dos sistemas de navegação autônomos propostos nos desafios do DARPA. Neste item, pretende-se enfatizar a importância da pesquisa aplicada, inicialmente a um sistema de ajuda ao condutor (SAC), dentro do contexto dos sistemas de navegação semi-autônoma, como produto intermediário do projeto de um veículo autônomo.

Em relação à navegação autônoma e semi-autônoma, destaca-se que em muitas ocasiões não será possível dispensar a presença do ser humano, principalmente em operações militares, o que faz com que sistemas autônomos e semi-autônomos tenham a mesma relevância (MIRANDA NETO & ZAMPIERI, 2008).

Neste sentido, no limiar da pesquisa dos sistemas de navegação autônomos, encontram-se os sistemas semi-autônomos (na Figura 2.1), nos quais, uma das diferenças básicas é que para um sistema autônomo se faz necessário conhecer o modelo cinemático e dinâmico do veículo, enquanto que para um SAC, necessita-se de uma interface homem-máquina (IHM) e/ou de um sistema de realidade virtual (SRV). Desta forma, para um sistema autônomo, o resultado da análise sensorial gera comandos de movimentos aos atuadores do veículo, enquanto que para um SAC são gerados alertas ao condutor, que por sua vez, interage com os atuadores do veículo (MIRANDA NETO & ZAMPIERI, 2008).

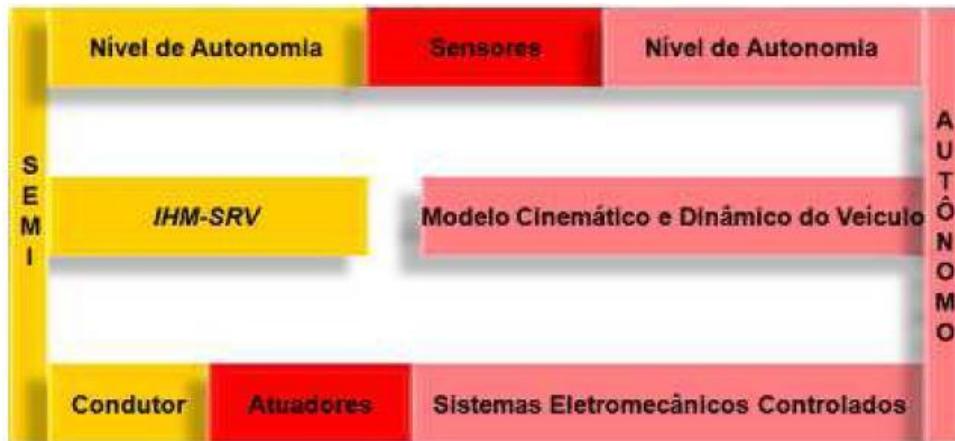


Figura 2.1 - Componentes principais dos Sistemas Autônomos e Semi-autônomos (MIRANDA NETO & ZAMPIERI, 2008).

Atualmente, a pesquisa na área de navegação autônoma e semi-autônoma tem motivado muitos pesquisadores, devido ao desafio que representa. Várias propostas têm sido estudadas, baseadas principalmente na multidisciplinaridade e no desenvolvimento de sistemas computacionais com inspiração biológica. Neste cenário, destaca-se o papel do ambiente no cumprimento de tarefas, por isso a geração de trajetórias pode ser macro classificada em duas grandes categorias, tendo o ambiente como elemento principal: conhecida e determinística; ou desconhecida e dinâmica (MIRANDA NETO & ZAMPIERI, 2008).

Tanto nos sistemas autônomos como semi-autônomos, para se obter as informações sobre o ambiente, são necessários sensores e atuadores, que muitas vezes, podem ser de alcance limitado e sujeitos a ruídos. No entanto, ao incorporar vários tipos de sensores, pode-se aumentar o grau

de autonomia e “inteligência”, principalmente em relação à navegação em ambientes desconhecidos. Em contrapartida, o tipo e a quantidade de sensores determinam o volume de dados para o processamento e composição da “imagem” do ambiente, impondo na maioria dos casos, um alto custo computacional. Este custo, muitas vezes, pode inviabilizar projetos que utilizem equipamentos de pouca capacidade e/ou de aplicações em tempo real (MIRANDA NETO & ZAMPIERI, 2008).

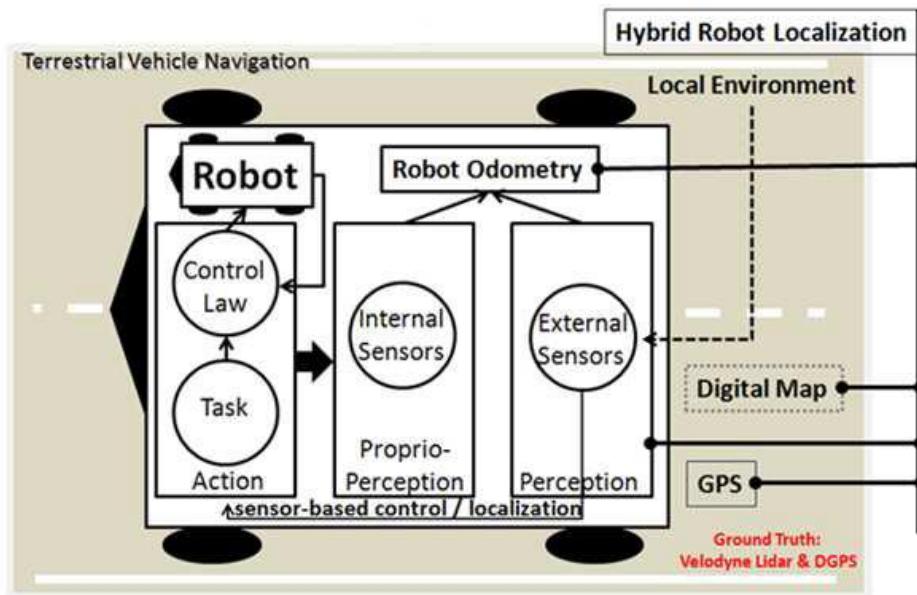
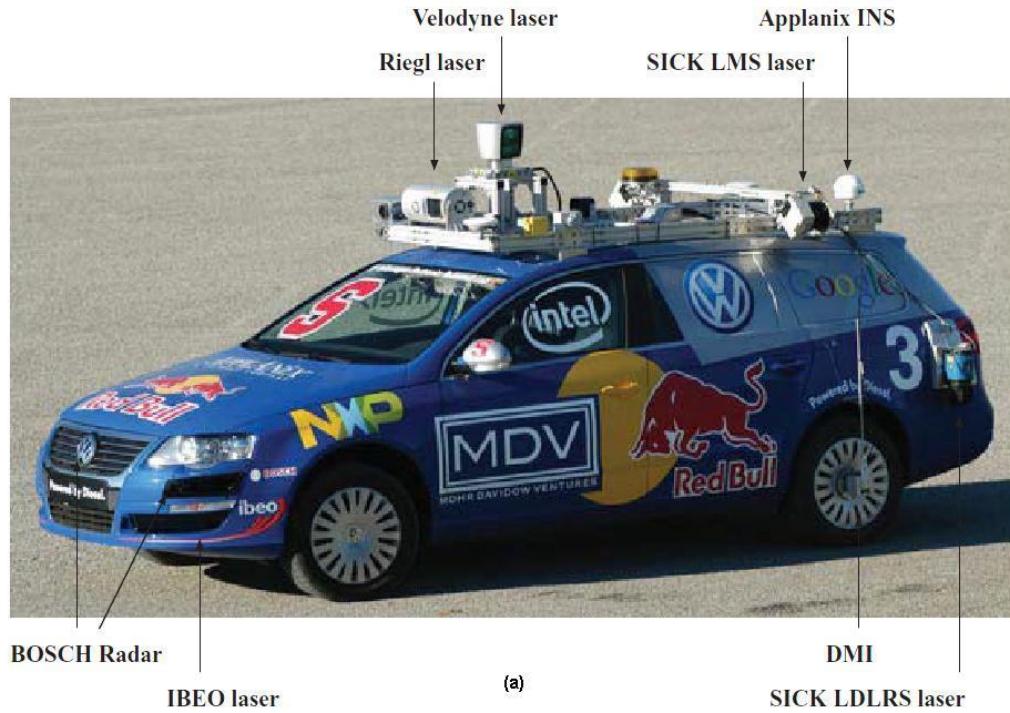
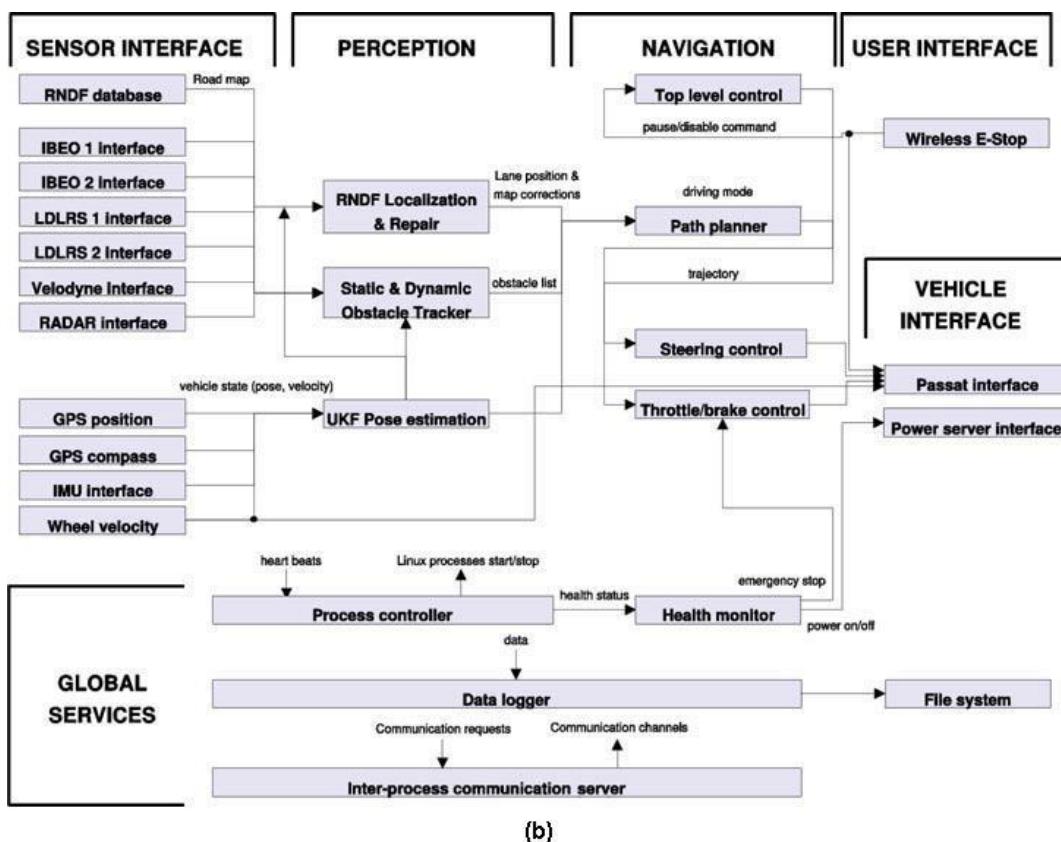


Figura 2.2 - Arquitetura do Veículo Terrestre (MIRANDA NETO, 2011b).

Em uma visão global e, como apresentado na Figura 2.2, a pesquisa em mobilidade terrestre, comum para sistemas semi- e autônomos, estrutura-se em três principais camadas: Percepção, Navegação e Controle. De acordo com Thrun et al. (2006), estes sistemas podem ser organizados em cinco principais grupos funcionais: (i) Interface com sensores; (ii) Percepção; (iii) Controle; (iv) Interface com o veículo; e (v) Interface com o usuário (Robô Junior na Figura 2.3a). Este tipo de arquitetura facilita a separação de funções e desenvolvimento descentralizado, a partir da definição de interfaces entre os diferentes subsistemas (MIRANDA NETO, 2011a).



(a)



(b)

Figura 2.3 – Robô JUNIOR: (a) veículo, (b) diagrama de fluxo e módulos, equipe Stanford University, segundo lugar da competição *Urban Challenge* (BUEHLER et al., 2009).

Na Figura 2.3b pode-se observar o fluxo de dados dentro dos módulos que integram o Robô JUNIOR (Figura 2.3a) da equipe *Stanford University*, participante da competição *Urban Challenge - DARPA*.

### **2.1.1 Navegação Local baseada em Multisensores**

Na atualidade, os sistemas de localização baseados somente no GNSS (*Global Navigation Satellite System*) estão em estudo para uma nova geração. Os modelos mais utilizados são modelos híbridos (local + global), a fim de realizar tarefas de navegação (e controle de trajetórias) de forma precisa e segura. Estes modelos devem ter como entrada os dados advindos de um sistema de percepção multissensorial (MIRANDA NETO, 2011b).

O movimento de um veículo (definido como um corpo rígido em movimento no plano através de duas rodas traseiras e duas rodas dianteiras direcionadas) está sujeito a vários tipos de restrições, e a trajetória nominal tem que respeitá-las. Estas restrições são: (i) Restrições cinemáticas; (ii) Restrições dinâmicas; e (iii) Riscos de colisão: possibilidade de colisão com obstáculos fixos e móveis do ambiente (área local de navegação). Muitas das informações sobre o estado do veículo estão disponíveis no barramento (ou rede) CAN (*Controller Area Network*). Dentre elas destacam-se: velocidade de rodas; ângulo do volante; potência do motor; sinal de acionamento do pedal de freio monitorado pelo módulo ABS (*Anti-lock Breaking System*); módulo de injeção eletrônica que recebe um sinal e o utiliza para o corte de combustível nas desacelerações (por exemplo, freio motor) ou para o monitoramento do sistema de controle de velocidade automático (piloto automático); nível de pressão dos pneus; etc (MIRANDA NETO, 2011b).

Entretanto, a resolução de problemas de controle requer a determinação do estado do veículo, que não pode se basear somente em dados fornecidos por sensores proprioceptivos que, por sua vez, não consideram problemas oriundos da interação com o ambiente. Dessa forma, para a tarefa de navegação, a localização do veículo em seu espaço de trabalho/interação deve ser

precisa. Dados de sensores exteroceptivos (por exemplo: câmeras) são fundamentais, pois portam informações do veículo em seu ambiente. Também, sensores de força quantificam o contato com os elementos exteriores ao veículo, como por exemplo, os sensores de proximidade ou telemétricos (ultra-sons, radares, lasers, etc) que detectam os objetos a certa distância do veículo (MIRANDA NETO, 2011b).

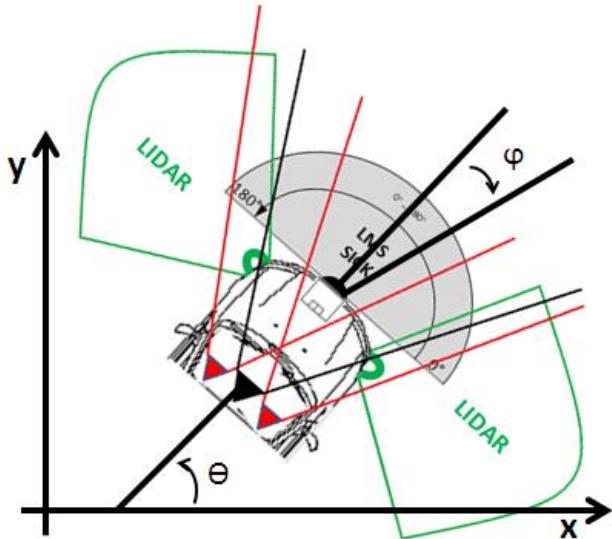


Figura 2.4 - Leitura do espaço de trabalho/interação baseada em informações proprioceptivas do veículo, sensores exteroceptivos, de proximidade e telemétricos (MIRANDA NETO, 2011b).

A partir da fusão das informações do veículo e dos sensores embarcados, ou seja, de sensores internos e externos representados, por exemplo, por um modelo de grades de ocupação, o planejamento de trajetória (local) é mais um passo importante na arquitetura de controle do sistema. Este módulo calcula uma trajetória nominal a fim de conduzir o veículo até seu objetivo, ou seja, o mapa local. Esta trajetória é uma sequência ordenada de estados em tempo contínuo. No caso representado na Figura 2.4, pretende-se lembrar do compromisso entre as configurações (velocidade, orientação, percepção baseada em sensores, etc), o estado atual do veículo e seu objetivo. A trajetória ideal, obviamente, deve ser livre de colisões, satisfazer as restrições cinemáticas e dinâmicas do veículo e incluir conforto aos passageiros (MIRANDA NETO, 2011b).

A fim de planejar uma trajetória segura e evitar obstáculos em ambientes dinâmicos, o conhecimento do comportamento futuro é exigido (por exemplo, a partir de filtros e de técnicas de rastreamento de objetos). O planejamento de trajetória para veículos tipo-carro em ambientes dinâmicos permanece um problema em aberto. Para a execução de determinada trajetória local, o sistema de controle do veículo desempenha papel fundamental (MIRANDA NETO, 2011b).

### 2.1.2 Navegação Global baseada em um Modelo Híbrido de Localização

De acordo com Miranda Neto (2011b), a localização precisa, acessível e confiável é uma tarefa importante nas atuais atividades de pesquisa da indústria de automóveis. A localização deve contribuir diretamente para a execução de trajetórias locais e globais. Para a localização global, há uma grande variedade de abordagens para se obter um resultado de maior precisão. Como mostra a Figura 2.5, uma tendência mais atual considera pontos de referência em imagens (visão computacional), combinados com sistemas de localização GNSS/IMU (*Inertial Measurement Unit*) de baixo custo, aliados a informações de odometria (sensores internos), informações oriundas de mapas digitais e, por fim, modelos de filtragem para decisão (MATTERN et al., 2010; LANEURIT et al., 2003).



Figura 2.5 – Localização de veículos de alta precisão (MATTERN et al., 2010).

Segundo Bonin-Font et al. (2008), o ato de navegar em robótica diz respeito ao processo de determinar uma trajetória entre dois pontos: início e objetivo, baseando-se em sinais de diferentes

sensores. Para a navegação aérea ou em terra, denominada autônoma, o sensor mais utilizado em combinação com outros tipos é o de visão, enquanto, na aplicação sob a água, a navegação baseia-se em sinais acústicos. De modo geral, pode-se subdividir a navegação em duas grandes classes:

- Ambiente previamente conhecido;
- Não existem dados sobre o ambiente (exceto tarefa).

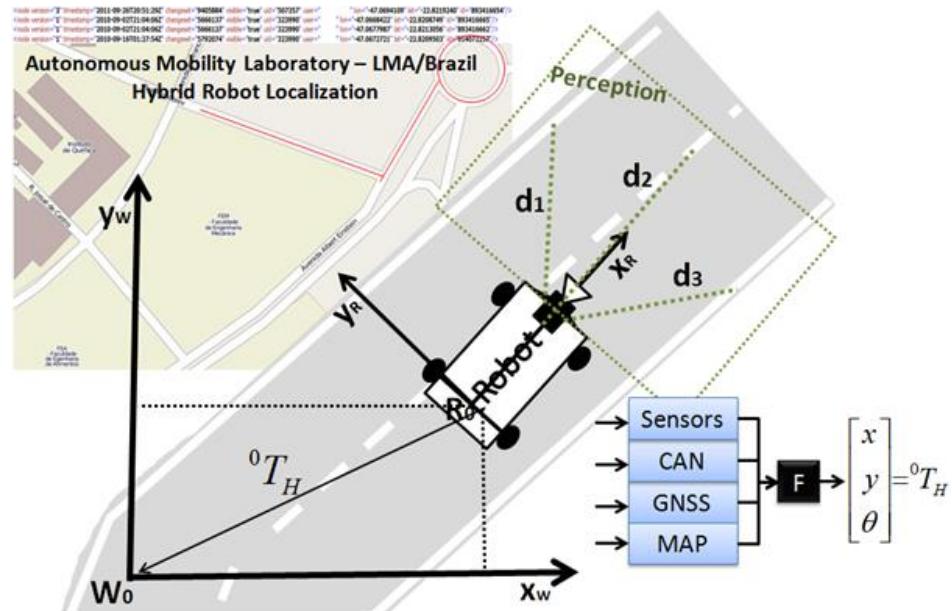


Figura 2.6 – Modelo Híbrido de Localização (MIRANDA NETO, 2011b).

A segunda classe é genericamente denominada como sistemas de navegação sem mapa (*Mapless*), e tem sido objeto de grande interesse estratégico e militar.

## 2.2 O Problema da Navegação Autônoma

Oliveira Assfalk (1995) define o problema da navegação autônoma de modo sucinto da seguinte forma:

*“Seja um ambiente de operação A contendo um conjunto de objetivos T e um conjunto não-vazio de obstáculos O e um veículo V com um conjunto de sensores*

*S. Considerar-se-á esse veículo V como sendo um veículo autoguiado, ou seja, capaz de navegação autônoma, se, utilizando apenas as informações sobre o ambiente A fornecidos pelos sensores S, o veículo V for capaz de, através de um algoritmo de controle conveniente C que não contenha componente humano H algum, atingir os objetivos T sem se chocar com um ou mais obstáculos O”.*

De uma forma mais simples, Bonin-Font et al. (2008) define a navegação como sendo o processo de determinar um adequado e seguro caminho entre um ponto inicial e um alvo final, para que um robô faça o trajeto entre eles. O problema de Navegação Autônoma aparenta simplicidade por ser facilmente resolvido por um ser humano, que possui inúmeros recursos (memória, capacidade de abstração, aprendizagem não-supervisionada e riqueza de informações colhidas através de seus sensores).

Os métodos de navegação autônoma podem ser organizados baseados em dois critérios: (1) filosofia empregada e (2) características operacionais. No âmbito da filosofia de projeto identificam-se três tipos de sistemas de controle autônomo: (1a) planejados; (1b) reativos; e (1c) comportamentais. De outro lado, a classificação por características operacionais permite uma vasta quantidade de categorias, podendo-se considerar parâmetros relevantes: (2a) uso de memória (genética, ontológica, cultural-social); (2b) capacidade de aprendizagem e adaptabilidade; (2c) uso de informação global ou local (uso de apenas dados/ambiente colhidos pelos sensores) (OLIVEIRA ASSFALK, 1995).

Em continuação, segue um resumo dos métodos de navegação classificados por filosofia, com seus respectivos parâmetros mais relevantes:

*Navegação por Planejamento:* Suas ações são baseadas na correlação entre um modelo interno do ambiente de operação e o ambiente real. Todas as características consideradas relevantes são pré-determinadas durante o projeto e incluídas na apresentação interna. Os sensores são encarregados de atualizar este modelo, uma vez que em um ambiente complexo, esta atualização poderá inviabilizar a reação (a eventos externos) em tempo real. É importante que o

modelo interno reflita as características mais importantes do ambiente, senão, as decisões nele baseadas estarão seriamente comprometidas.

*Navegação Reativa:* Associa um conjunto de ações a cada conjunto possível de estímulos (estímulo-ação). Esta forma de processamento é localizada, pois considera apenas os estímulos ambientais atuais provindos de ambientes circundantes, colhidos por sensores. A agregação de estados internos (memória) à arquitetura reativa, sob a forma de estímulos internos, permite uma globalização temporal da estratégia de navegação. Os estímulos internos forneceriam um modo de comparação do estado atual com experiências passadas. Exemplos típicos destas arquiteturas são os sistemas nebulosos e as redes neurais mais simples.

*Navegação Comportamental:* Estes sistemas são considerados uma evolução dos sistemas reativos. Comportamentos são modos distintos de operação caracterizados por conjuntos distintos de relações entre estímulos e ações. Um módulo pode compartilhar sensores com outros módulos. Os módulos interagem entre si, modificando os sinais de entrada fornecidos a outros módulos. A composição das ações de cada módulo será a ação tomada pelo sistema (p.e. Arquitetura *Subsumption*) (MEIRELLES & ALVAREZ-JÁCOBO, 2002).

## 2.3 Navegação por visão para Sistemas Autônomos Móveis

Como descrito por Bonin-Font et al. (2008), a navegação de robôs móveis, baseada em visão computacional, tem sido fonte de inúmeras contribuições na pesquisa nas últimas décadas, sobretudo no campo da visão e do controle. A visão computacional está se tornando mais comum em aplicações como: localização; construção de mapas (*automatic map construction*); navegação autônoma; seguimento de rotas; inspeção; monitoramento ou detecção de situações de risco. Na sequência, são resumidas as pesquisas de maior progresso tecnológico na área da navegação por visão para veículos autônomos terrestres, aéreos e subaquáticos, dividindo-as em dois principais enfoques: (1) navegação baseada em mapas (*map-based navigation*); e (2) navegação sem mapas (*mapless navigation*). O primeiro enfoque pode ser subdividido em: (1a) navegação métrica baseada em mapas (*metric map-based navigation*) e (1b) navegação topológica baseada em

mapas (*topological map-based navigation*). A navegação sem mapas inclui técnicas baseadas na extração de características qualitativas, localização baseada na aparência, fluxo óptico, seguimento/monitoramento de características, detecção/monitoramento de terrenos planos, etc.

### 2.3.1 Navegação por visão: Primeiras técnicas

Segundo Desouza e Kak (2002) pode-se estruturar a navegação visual de robôs em duas linhas principais: (1) navegação exterior (*outdoor navigation*) e (2) navegação interior (*indoor navigation*). A navegação exterior também pode ser subdividida em (1a) ambientes estruturados e (1b) não estruturados. Da mesma forma, a navegação interior pode ser subdividida em (2a) navegação baseada na construção de mapas (*map-building based navigation*) e (2b) navegação sem mapas (*mapless navigation*). Na Figura 2.7, pode-se observar um resumo das abordagens definidas para a navegação de sistemas autônomos móveis por visão.

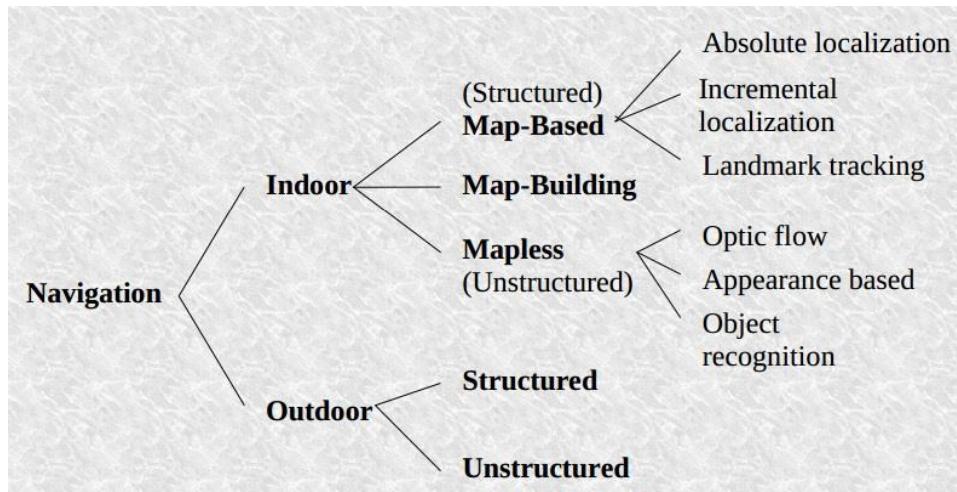


Figura 2.7 – Tipos de Navegação, resumidos segundo Desouza e Kak (2002) com alguns destaque.

Na Tabela 2.1 pode-se visualizar as principais contribuições das pesquisas na área da navegação visual, desde os primeiros anos até os anos 90. Foram relacionadas as pesquisas (*indoor/outdoor*) por ano de publicação, para poder observar melhor a evolução das mesmas ao longo do período.

Tabela 2.1 – Resumo dos trabalhos em Navegação por visão por ano de publicação (1979 a 2000)  
adaptado da Tabela original de Bonin-Font et al. (2008), *Indoor-Outdoor*.

Ano Publicação	Indoor-Outdoor	Categoria	Método
<b>2000, 1999, 1998</b>	<i>Indoor</i>	<i>Map based</i>	<i>Absolute localization</i>
<b>1998</b>	<i>Indoor</i>	<i>Map building</i>	<i>Grid and topological representation</i>
<b>1998</b>	<i>Indoor</i>	<i>Mapless</i>	<i>Optical flow</i>
<b>1997</b>	<i>Indoor</i>	<i>Map based</i>	<i>Landmark tracking</i>
<b>1997</b>	<i>Indoor</i>	<i>Mapless</i>	<i>Optical flow</i>
<b>1997</b>	<i>Indoor</i>	<i>Mapless</i>	<i>Appearance-based navigation</i>
<b>1996</b>	<i>Indoor</i>	<i>Mapless</i>	<i>Appearance-based navigation</i>
<b>1996</b>	<i>Indoor</i>	<i>Mapless</i>	<i>Appearance-based navigation</i>
<b>1995, 1993, 1993, 1992</b>	<i>Indoor</i>	<i>Map based</i>	<i>Topological map Incremental localization</i>
<b>1995, 1991</b>	<i>Indoor</i>	<i>Map based</i>	<i>Occupancy grids</i>
<b>1995, 1989</b>	<i>Indoor</i>	<i>Map based</i>	<i>Force fields</i>
<b>1994</b>	<i>Indoor</i>	<i>Map based</i>	<i>Incremental localization</i>
<b>1993</b>	<i>Indoor</i>	<i>Mapless</i>	<i>Optical flow</i>
<b>1993</b>	<i>Indoor</i>	<i>Map based</i>	<i>Absolute localization</i>
<b>1990</b>	<i>Indoor</i>	<i>Map building</i>	<i>Occupancy grid</i>
<b>1987</b>	<i>Indoor</i>	<i>Map based</i>	<i>Incremental localization</i>
<b>1987</b>	<i>Indoor</i>	<i>Map based</i>	<i>Incremental localization</i>
<b>1987</b>	<i>Indoor</i>	<i>Map based</i>	<i>Landmark tracking</i>
<b>1985</b>	<i>Indoor</i>	<i>Map based</i>	<i>Occupancy grids</i>
<b>1983</b>	<i>Indoor</i>	<i>Map building</i>	<i>Occupancy grid</i>
<b>1983</b>	<i>Indoor</i>	<i>Map building</i>	<i>Stereo 3D reconstruction</i>
<b>1995</b>	<i>Outdoor</i>	<i>Unstructured environments</i>	<i>Given mission exploration</i>
<b>1995</b>	<i>Outdoor</i>	<i>Unstructured environments</i>	<i>Random exploration</i>
<b>1995, 1989</b>	<i>Outdoor</i>	<i>Structured environments</i>	<i>Road following</i>
<b>1992</b>	<i>Outdoor</i>	<i>Unstructured environments</i>	<i>Random exploration</i>
<b>1992</b>	<i>Outdoor</i>	<i>Structured environments</i>	<i>Road following</i>
<b>1988</b>	<i>Outdoor</i>	<i>Structured environments</i>	<i>Road following</i>
<b>1988, 1987</b>	<i>Outdoor</i>	<i>Structured environments</i>	<i>Road following</i>
<b>1979</b>	<i>Outdoor</i>	<i>Structured environments</i>	<i>Road following</i>

### **2.3.1.1 Navegação Indoor**

Segundo Bonin-Font et al. (2008), dependendo como os sistemas de controle incorporam informações do ambiente no qual o robô navegará, o sistema de navegação e localização poderá estar inserido dentro de três grupos: (i) Sistemas de navegação baseado em mapas; (ii) Sistemas de navegação baseado na construção de mapas; (iii) Sistemas de navegação sem mapas.

A navegação (i) baseada em mapas pressupõe que o robô tenha, *a priori*, os modelos do ambiente, os quais possuem diferentes graus de detalhamento. Os primeiros trabalhos utilizavam mapas de ocupação 2D, mostrando as características mais relevantes do ambiente. Campos virtuais de forças também foram utilizados, emulando forças repulsivas entre os obstáculos e o robô. A probabilidade começa a ser empregada para mensurar as incertezas, por meio de sensores e câmeras que trabalham em conjunto e criam grades de ocupação (*occupancy grids*), as quais representam uma região observada e, cada célula desta grade é nomeada conforme a possibilidade de ser ocupada por um objeto. Quando o robô adquire o mapa do local onde está inserido, pode começar a navegar fazendo coincidir as marcas encontradas nas imagens *online*, com as marcas esperadas na base de dados. Este processo se denomina auto-localização. O processo de auto-localização pode ser descrito como sendo: (i) aquisição da informação (imagem), (ii) detecção de marcas na imagem atual, (iii) comparação das marcas observadas com as armazenadas na base de dados, seguindo alguns critérios. Nos métodos de auto-localização absoluta, a posição do robô é conhecida completamente.

Na localização relativa, assume-se que no início da navegação o posicionamento do robô seja aproximadamente conhecido. Matthies e Shafer (1987) utilizaram outros sensores e técnicas para reduzir os erros, como por exemplo visão estéreo. Christensen et al. (1994) combinaram modelos CAD na representação do espaço com visão estéreo na redução de erros.

NEURU-NAV (MENG, 1993a; 1993b) é um exemplo representativo das estratégias de navegação baseadas em mapas dentro da representação topológica do espaço. Esta técnica de navegação utiliza gráficos de linhas e nós para desenhar os pontos representativos de um

corredor. Pontos e nós são atribuídos às informações a respeito do que eles representam (corredor central, porta, esquina, cruzamentos) e a distância entre os nós vinculados por linhas.

Algoritmos de rastreamento de marcas determinam o posicionamento do robô, detectam marcas, naturais ou artificiais, nas imagens da câmera e as rastreiam nas imagens seguintes. Tanto nas marcas naturais como nas artificiais, o robô precisa conhecer a “identidade” da marca para logo ser capaz de monitorá-la. Este sistema tem sido utilizado em sistemas de navegação baseados em mapas e em algumas arquiteturas de navegação reativa. Kabuka e Arenas (1987) foram os primeiros a utilizar o monitoramento de marcas artificiais. Um exemplo de navegação baseada no monitoramento de marcas naturais é encontrado em Hashima et al. (1997). Este trabalho selecionou marcas, utilizou técnicas de correlação para monitorá-las, calculou seu posicionamento em 3D por meio de informação da visão estéreo e selecionou novas marcas para manter o movimento, a fim de alcançar o alvo final.

A navegação (ii) baseada na construção de mapas abrange todos os sistemas que podem explorar o ambiente e construir seus próprios mapas por si mesmo. O processo de navegação se inicia quando o robô já explorou o ambiente e tem armazenado sua representação. O primeiro a considerar esta possibilidade foi Moravec (1983) com seu *Stanford Car*, o qual foi melhorado por Thorpe (1983) no robô FIDO e utilizado para se obter características das imagens, as quais foram correlacionadas para conseguir suas coordenadas 3D.

A navegação (iii) sem mapas inclui todas as abordagens em que não é necessário conhecer *a priori* o ambiente. Os movimentos do robô dependem dos elementos observados no ambiente (paredes, características, portas, mesas, etc). As duas principais técnicas são: (a) fluxo óptico (*optical flow*), no qual se estima o movimento dos objetos (ou características) dentro de uma sequência de imagens; e (b) navegação baseada em aparências (*apparence-based navigation*), a qual se baseia na comparação de imagens armazenadas (fase prévia), o robô se auto localiza e navega correlacionando as imagens reais (*on-line*) com modelos armazenados.

### **2.3.1.2 Navegação *Outdoor***

A navegação externa, foi classificada pelo tipo de ambiente no qual o robô está inserido: (i) ambientes estruturados, e (ii) ambientes não estruturados.

A navegação externa em ambientes estruturados refere-se especificamente à capacidade de detectar e seguir uma rota. Um dos primeiros projetos foi o NAVLAB (BONIN-FONT et al., 2008). Houve também outros projetos como: VITS, ALVINN, EUREKA. Em destaque o visionário projeto PROMETHEUS, cujo objetivo foi o desenvolvimento de um sistema de direção automático para substituir o motorista durante um período longo de direção. O sistema incluía também um módulo para socorrer o motorista em situações de perigo eminente.

Em ambientes não estruturados, devido às características particulares do ambiente, existirão dois tipos de situações para a navegação do robô: (a) exploração aleatória, por exemplo veículos planetários; e (b) execução de uma determinada missão com conhecimento da posição do alvo (BONIN-FONT et al., 2008). Dependendo da natureza desta missão, o robô poderá construir um mapa do ambiente, necessitando para isso um sistema de (auto) localização.

### **2.3.2 Navegação por visão: evolução até o presente**

Na Tabela 2.2 são listados os principais trabalhos na área da navegação por visão, a mesma é dividida em duas categorias: navegação com mapas e sem mapas (BONIN-FONT et al., 2008). Observando-se o ano das publicações apresentadas nesta tabela (decrescente), percebe-se a evolução das pesquisas nesta área.

#### **2.3.2.1 Sistemas de navegação baseados em mapas**

Os sistemas baseados em mapas precisam de algum conhecimento do ambiente e podem ser classificados em: (i) sistemas de navegação que usam mapas métricos; (ii) sistemas de navegação que constroem mapas métricos; e (iii) sistemas de navegação baseados em mapas topológicos.

Tabela 2.2 – Resumo dos trabalhos em Navegação por visão por ano de publicação (1994 a 2006)  
adaptado da Tabela original de Bonin-Font et al. (2008) *Map. building-Mapless*.

Ano Publicação	Tipo de veículo	Categoria	Estratégia	Tipo de sensor
2006, 2006	Ground	Map building	<i>Visual SLAM.</i> <i>Landmarks extraction and occupancy grids</i>	Stereo cameras
2006	Ground	Map building	<i>3D high density map and object recognition</i>	Single standard camera
2006	Ground	Map building	<i>Museum guiding robot: topological map</i>	Single standard camera
2006, 2005, 2005, 2003, 1998	Ground	Map building	<i>Visual sonar</i>	Single standard camera
2006, 2003	Ground	Map building	<i>Topological map</i>	Single standard camera
2005	Ground	Map building	<i>3D construction of an occupancy grid</i>	Single standard camera
2005	Ground	Map building	<i>Human guided pre-training</i>	Single wide angle camera
2005, 2004	Amphibious	Map building	<i>Visual SLAM. 3D total map building</i>	Trinocular stereo cameras
2004	Ground	Map building	<i>Visual SLAM 3D sparse mapping of interestpoint</i>	Single wide angle camera
2003	Ground	Map building	<i>Visual SLAM. Map feature extraction</i>	Single standard camera
2003, 2001	Ground	Map building	<i>Visual SLAM.</i> <i>Landmarks localization and tracking</i>	Single standard camera
2002	Ground	Map building	<i>Local occupancy grid</i>	Single standard camera
2002	Ground	Map building	<i>Local occupancy grid</i>	Stereo cameras
2002	Ground	Map building	<i>Local occupancy grid</i>	Single standard camera
2002	Ground	Map building	<i>Human guided pre-training</i>	Stereo cameras
2002, 2000, 1995, 1986.	AUV	Map building	<i>Underwater floor mosaicking</i>	Single standard camera
2000	Ground	Map building	<i>Topological map</i>	Omnidirectional camera
1999	Ground	Map building	<i>Topological map</i>	Omnidirectional camera
1999	Ground	Map building	<i>Museum guiding robot: complete 3D map</i>	Single standard camera
1994	Ground	Map building	<i>Local occupancy grid</i>	Stereo cameras

Tabela 2.2 – Resumo dos trabalhos em Navegação por visão por ano de publicação (1994 a 2006) adaptado da Tabela original de Bonin-Font et al. (2008), *Map building-Mapless* (continuação 1)

Ano Publicação	Tipo de veículo	Categoria	Estratégia	Tipo de sensor
2003, 2001	Ground	Map building	Visual SLAM. Landmarks localization and tracking	Single standard camera
2002	Ground	Map building	Local occupancy grid	Single standard camera
2002	Ground	Map building	Local occupancy grid	Stereo cameras
2002	Ground	Map building	Local occupancy grid	Single standard camera
2002	Ground	Map building	Human guided pre-training	Stereo cameras
2002, 2000, 1995, 1986.	AUV	Map building	Underwater floor mosaicking	Single standard camera
2000	Ground	Map building	Topological map	Omnidirectional camera
1999	Ground	Map building	Topological map	Omnidirectional camera
1999	Ground	Map building	Museum guiding robot: complete 3D map	Single standard camera
1994	Ground	Map building	Local occupancy grid	Stereo cameras
2006	Ground	Mapless	Appearance-based method	Panoramic camera
2006, 2005, 1998, 1997, 1996, 1995	AUV	Mapless	Cable tracking	Single standard camera
2006, 2005, 2002, 2001	Ground	Mapless	Features tracking; homography	Single standard camera
2006	Ground	Mapless	Features tracking; homography	Stereo cameras
2006	UAV	Mapless	Optical flow: insect inspired (EMD)	Single standard camera
2005	UAV	Mapless	Optical flow: insect inspired	Stereo cameras looking forward combined with two sideways
2005	UAV	Mapless	Features tracking	Single wide angle camera
2004	AUV	Mapless	Features tracking; homography	Single standard camera
2004, 2000, 1999	AUV	Mapless	Station keeping	Single standard camera

Tabela 2.2 – Resumo dos trabalhos em Navegação por visão por ano de publicação (1994 a 2006) adaptado da Tabela original de Bonin-Font et al. (2008), *Map building-Mapless* (continuação 2).

Ano Publicação	Tipo de veículo	Categoria	Estratégia	Tipo de sensor
2004, 2000, 1999	Ground	Mapless	<i>Appearance-based method</i>	<i>Standard or omnidirectional single camera</i>
2004, 2003	UAV	Mapless	<i>Optical flow: insect inspired (EMD)</i>	<i>Single mini wireless camera</i>
2003, 2004	Ground	Mapless	<i>Optical flow combined with stereo information</i>	<i>Stereo cameras</i>
2003	Ground	Mapless	<i>Optical flow</i>	<i>Single standard camera</i>
2002, 1999	Ground	Mapless	<i>Features tracking: SIFT</i>	<i>Single standard camera</i>
2002, 1999	UAV	Mapless	<i>Optical flow: insect inspired (EMD)</i>	<i>Camera eye</i>
2001	Ground	Mapless	<i>Image qualitative characteristics extraction</i>	<i>Stereo cameras</i>
2000	Ground	Mapless	<i>Image qualitative characteristics extraction</i>	<i>Single standard camera</i>
1999, 1997	Ground	Mapless	<i>Image qualitative characteristics extraction</i>	<i>Single standard camera</i>
1996	Ground	Mapless	<i>Optical flow</i>	<i>Single wide angle camera</i>
1995	Ground	Mapless	<i>Optical flow</i>	<i>Single standard camera</i>

Os sistemas de navegação que constroem e utilizam mapas métricos incluem os sistemas que precisam de um mapa completo antes de iniciar a navegação e os sistemas que exploram seu ambiente e constroem seus mapas. Esta técnica é a que requer mais recursos computacionais (tempo de processamento e armazenamento). Os mapas métricos incluem informações de distâncias e/ou tamanhos da células. Caso a exploração e mapeamento de um ambiente desconhecido seja feito automaticamente e em tempo real, o robô deverá cumprir três tarefas: navegação segura, mapeamento e localização, de preferência de forma simultânea. SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*) e CML (*Concurrent Mapping and Localization*) são técnicas que procuram estratégias para explorar, mapear e se auto-localizar simultaneamente.

Um mapa topológico é uma representação gráfica do ambiente, na qual cada nó corresponde a uma característica específica do ambiente, a qual pode ser associada a uma ação (p.e. atravessar uma porta). Usualmente, não existem distâncias absolutas, nem referências com alguma coordenada. Este mapa é mais utilizado para a navegação de longas distâncias e, especialmente, em planejamento de rotas. Mapas topológicos são simples e compactos, ocupam menos memória e, consequentemente, o processo computacional que o torna apto à navegação é rápido. Nos últimos anos, Remazeilles et al. (2006) propuseram um sistema baseado na representação topológica do ambiente e em uma estratégia de posicionamento qualitativo. Não são representados por *frames*, vistas capturadas na fase de treinamento. Uma das possíveis aplicações seriam os robôs guias de museu.

Também existem os sistemas de navegação que constroem mapas locais e evitam obstáculos. A maioria das estratégias anteriormente vistas baseia-se na descrição global do ambiente. Este modelo pode ser obtido automaticamente pelo robô, ou em um estágio prévio de treinamento, antes de se iniciar a navegação. Nos anos 90, alguns autores desenvolveram uma solução na qual o processo de navegação visual era suportado pela construção *online* de uma grade de ocupação local. Esta técnica de navegação pode ser considerada “deliberativa” ou ser considerada uma técnica de navegação reativa baseada em visão.

### 2.3.2.2 Navegação sem mapas

Na Tabela 2.2 são relacionadas as principais técnicas de navegação visual reativas. Estes sistemas normalmente não precisam de nenhum conhecimento prévio do ambiente, simplesmente tomam decisões de navegação quando o percebem. Estes sistemas, pela sua técnica, podem ser classificados em: (a) baseados no fluxo óptico, (b) baseados em aparência, (c) baseados na extração e seguimento de características.

O fluxo óptico pode ser entendido como o movimento aparente de *features* (características) em uma sequência de imagens. A direção e a magnitude deste movimento podem ser calculadas a cada par de quadros consecutivos da câmera. O fluxo óptico tem sido utilizado por muitos

pesquisadores para implementar estratégias reativas na navegação de robôs móveis, tanto em ambientes externos como internos. Cabe destacar também que dentro desta pesquisa, um importante esforço tem sido dedicado a imitar o comportamento animal. Particularmente, os insetos apresentam um elevado grau de precisão nos seus sistemas de navegação e orientação, apesar da simplicidade do seu sistema nervoso e cérebro pequeno. Muitos autores têm estudado o modo como as abelhas (e outros insetos) utilizam o fluxo óptico para desviar de obstáculos e/ou navegar no meio de corredores estreitos e caminhos longos. Resultados experimentais encontrados por Srinivasan et al. (1991) revelaram que as abelhas voam “balanceando-se” no meio dos túneis, avaliando o movimento aparente das imagens que percebem de ambos os lados.

As estratégias baseadas em aparência consistem em dois procedimentos. Primeiro, chamado de fase de pré-treinamento, na qual imagens ou características mais importantes são guardadas em um modelo temporal. O segundo procedimento, conhecido como fase de navegação, no qual o robô precisa reconhecer o ambiente e se auto-localizar, comparando as imagens atualizadas *online* com as armazenadas. O principal problema das estratégias baseadas em aparência é o de encontrar um algoritmo apropriado para criar a representação do ambiente e definir o critério de correspondência (*matching*). Há duas principais formas de reconhecer o ambiente sem utilizar mapas (MATSUMOTO et al., 1999; 1996): (i) abordagem baseada no modelo, que utiliza objetos pré-definidos para reconhecer características em ambientes complexos e poder autolocalizar-se; e (ii) abordagem baseada na observação, na qual nenhuma característica é extraída das imagens pré-gravadas. A auto-localização é realizada com algoritmos de correspondência.

Técnicas visuais reativas para navegação de robôs e desvio de obstáculos estão dentro de características de imagens qualitativas. Existem dois principais tipos de sistemas para o desvio de obstáculos utilizando visão reativa: (i) sistema de desvio de obstáculos baseado no modelo; e (ii) baseado nos sensores. É evidente em sistemas de navegação, a crítica dependência que existe nos dados de sensoriamento à mudança das condições de imagem (intensidade, posição da luz, etc), como exemplo pode-se citar os problemas que existem na navegação externa relativos às condições do clima. Neste sentido, a navegação *fuzzy* tem sido utilizada por vários autores para extrair informações qualitativas dos *frames*.

Técnicas para seguimento de elementos móveis (quinas, linhas, regiões específicas, etc) em uma sequência de vídeos têm se mostrado robustas na navegação. Muitas vezes o sistema divide o problema do seguimento em dois sub-problemas: primeiro, detecção do movimento, na qual dada uma característica (*feature*) a ser seguida, identifica-se uma região no próximo *frame*, na qual é provável que se encontre esta mesma característica; e segundo, correspondência de características, na qual a característica (*feature*) que está se seguindo é identificada sem ter identificado a sua região.

## 2.4 Sistemas de Percepção LIDAR-3D: Estado da Arte

Em continuação, são resumidos brevemente alguns trabalhos relacionados com os sistemas de mapeamento baseados em LIDAR 3D, uma vez que dada a sua atualidade e contribuição científica, acredita-se ser importante mencionar.

A partir da disponibilidade da utilização dos *scanners* 2D, várias publicações referidas ao desenvolvimento de Sistemas LIDAR 3D, para aplicações robóticas, vêm sendo apresentadas. Destaca-se, de forma especial os trabalhos de Tripp et al. (2003) e de Sheh et al. (2006). Estes utilizam um *scanner* Hokuyo LIDAR 2D (alcance máximo de 4,5 m), para construir um *scanner* tipo 3D, mais econômico quando comparado a outras soluções, e com boa qualidade nos dados 3D em ambientes internos.

Bakambu et al. (2006) apresentaram uma importante contribuição para o desafio de navegar e modelar ambientes 3D com “*rovers*” (cooperação de robôs), especificamente em tarefas de navegação de longo alcance. Dois métodos de localização complementares são analisados: (i) odometria 3D baseada em fusão de sensores e (ii) localização baseada em terrenos 3D. Também foram trabalhados problemas de: oclusão, dados esparsos e diferença de resoluções.

Craig et al. (2007) apresentaram o desenvolvimento das empresas *Ball Aerospace & Technologies Coorporation*, que resultou em uma nova ferramenta capaz de produzir um vídeo 3D em tempo real utilizando LADAR *flash*. O número de cálculos requeridos para o

processamento dos dados é muito reduzido, uma vez que os pontos são capturados simultaneamente e correlacionados, o que permite a utilização eficiente do processador FPGA (*Field Programmable Gate Array*). Esta técnica é prevista para aplicações de vôo no ar e no espaço.

A tendência à utilização de vários sistemas de sensoriamento, dentro dos sistemas robóticos, mostra a importância de desenvolver modelos matemáticos para realizar a integração (fusão) dos sensores, como descrito no trabalho de Willis et al. (2009), que mostra um método de calibração para um sistema LIDAR-visual.

Tang e Zakhor (2011) desenvolveram uma técnica baseada em “*weighted random forest trees*”, para poder identificar objetos 3D em rotas, utilizando sensores do tipo LIDAR, GPS e sistema de navegação inercial (IMU). Os primeiros objetos de interesse, para este reconhecimento, foram simples “tijolos” (em diversas posições/orientações). A variação da velocidade do veículo durante o reconhecimento também foi analisada pelos pesquisadores.

Destaca-se também o desenvolvimento de um sofisticado sensor do tipo LIDAR 3D, denominado KIDAR-B25 por Lee et al. (2011), utilizado para realizar medição de imagens 3D. Este sistema utiliza o método direto TOF (*Time-Of-Flight*), um transmissor de pulsos a laser. Este sensor foi desenvolvido a fim de ser utilizado na navegação de robôs móveis. Testes foram feitos em ambientes externos podendo detectar e evitar objetos móveis em tempo real.

Weiss e Biber (2011) apresentaram os sensores tipo LIDAR 3D como sendo os mais promissores para utilização em aplicações com robôs agrícolas autônomos, principalmente na detecção e mapeamento de plantas, avaliando a sua utilização em diversas condições ambientais. Foi desenvolvido um algoritmo capaz de detectar plantas de forma confiável em tempo real.

Ren et al. (2011) mostraram que imagens 3D criadas por ultra-som podem se mostrar consistentes para intervenções guiadas por imagens (principalmente dentro do problema de cirurgias minimamente invasivas). A taxa de *frames* em tempo real possibilitaria a potencial

utilização desta técnica em tarefas de seguimento de instrumentos (baseado em imagens). Estes recursos facilitam a sua utilização na visualização de instrumentos, compensação de movimentos, assim como em tarefas cirúrgicas autônomas.

Dentro dos trabalhos realizados a partir da análise de nuvens de pontos, Quanwen et al. (2012) desenvolveram um algoritmo para o reconhecimento de cruzamentos (intersecções) a partir da tecnologia LIDAR 3D. Primeiro se constrói um mapa (de grades) a partir dos dados recebidos, se retiram os dados correspondentes a outros veículos, se analisam as características destes dados utilizando um modelo de alcance (a partir do veículo) e finalmente, se utiliza um classificador tipo SVM (*Support Vector Machine*) para reconhecer o tipo de cruzamento que está sendo “percebido”. Previamente é classificada a rota momentânea como sendo um segmento de rota ou uma intersecção. Caso seja esta última, se classifica a mesma como sendo de dois tipos: “T” ou “+”.

Stiller e Ziegler (2012) se aprofundaram na pesquisa sobre a aquisição e representação do conhecimento (percepção por visão: vídeo e LIDAR) dos veículos autônomos “cognitivos”, como base para a tomada de decisões autônomas. Na Figura 2.8 verifica-se que para poder dirigir (guiar) um veículo, por um humano ou por uma máquina “cognitiva”, é necessário dividir o conhecimento/percepção do ambiente em 3 aspectos básicos: (i) conhecimento métrico, linhas e figuras geométricas em amarelo, posição e velocidade de outro veículo (25 m, 30 km/h). Esta percepção é necessária para que o veículo se mantenha na rota de forma segura; (ii) conhecimento simbólico, em laranja, classificação de linhas/faixas/áreas de navegação como: espaço para com o veículo da frente (ou de trás), ciclovias, calçadas, etc (*vehicle lane forward, bicycle lane*); e objetos ( $P_1, P_2, P_3, S_1, S_2$  e  $S_3$ ). Esta percepção é importante para conseguir cumprir as regras básicas da navegação urbana (trânsito); (iii) conhecimento conceitual, em vermelho, quando se consegue identificar relações entre “outros” participantes da navegação ( $P_1$  follows  $P_3$ ) a fim de poder antecipar a evolução do cenário e dirigir preventiva e antecipadamente. Neste caso, as percepções métrica e simbólica se transformam em uma percepção abstrata (cognitiva).

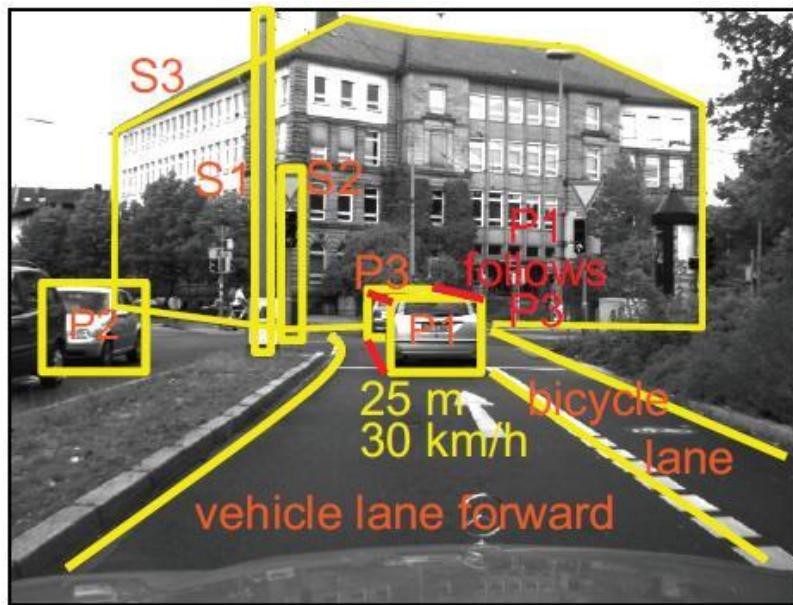


Figura 2.8 - Tipos de “conhecimentos/percepções” que um robô autônomo móvel “cognitivo” precisaria ter: i) métrico (amarelo); ii) simbólico (laranja); e iii) conceitual (vermelho) segundo a pesquisa de Stiller e Ziegler (2012).

## 2.5 Mapeamento: Pesquisas relacionadas

Em continuação são resumidos brevemente alguns trabalhos relacionados com mapas telemétricos, em específico grades de ocupação, que pela sua atualidade, acredita-se ser importante mencionar.

Singhal e Brown (1997) apresentam uma das primeiras abordagens à fusão de sensores multimodais utilizando redes Bayesianas dinâmicas e grades de ocupação. O ambiente é representado por uma grade de ocupação, a qual é construída utilizando dados probabilísticos obtidos dos múltiplos sensores. Cada célula, dentro da grade de ocupação, armazena probabilisticamente as características, posicionamento, propriedades e, inclusive, o movimento dos objetos que estão no mundo real.

Pagac et al. (1998) abordaram a construção e atualização do mapa do ambiente do veículo autônomo para propósitos de navegação, utilizando raciocínio probatório. O mapa foi construído como uma grade de ocupação do tipo 2D e as leituras dos sensores foram fundidas no mapa, utilizando a regra de inferência *Dempster-Shafer*. Os mapas gerados foram experimentalmente avaliados utilizando sensores do tipo sonar.

Grabowski et al. (2000) apresentaram uma interessante pesquisa na área de inteligência colaborativa de robôs para tarefas de exploração e mapeamento de ambientes desconhecidos. Este “sistema robótico distribuído” foi constituído principalmente por pequenos robôs móveis denominados *Millibots*, que possuem um conjunto completo de sistemas integrados (sensoriamento, comunicação, computação, localização e mobilidade). Os mini-robôs foram concebidos como módulos, permitindo-se ter vários robôs especializados (principalmente na configuração do sensoriamento), o que expandiu potencialmente a capacidade do sistema. Um importante componente deste sistema foi o sistema de localização baseado em ultra-som (proposto pelos autores), o qual permitiu o rastreamento da posição dos mini-robôs. Cada robô tinha a tarefa de explorar um ambiente desconhecido com seus sensores de ultra-som e infravermelhos. O “líder” da equipe de mini-robôs coletava todas as informações e as integrava em um mapa global do ambiente. O sistema empregava uma representação de grades de ocupação e um método bayesiano de atualização para fundir os dados ao longo do tempo e construir um mapa da área.

Para o mapeamento de ambientes, na camada de percepção, existem vários métodos, como explicado anteriormente, sendo os principais os topológicos e os baseados em grades. Quando se fala dos métodos baseados em grades, a principal diferença está no método de integração (fusão) dos dados. Hoseinnezhad et al. (2002) compararam o desempenho de três métodos para a integração (fusão) de dados de sensores de ultra-som e de laser: i) *Fuzzy*; ii) *Dempster*; e iii) *Bayesiano*. A representação geral do ambiente é realizada em um mapa de grades de ocupação. Na comparação, os métodos são formulados, aplicados e simulados para solucionar um único problema: construir um mapa com um robô equipado com oito sensores de ultra-som, um sensor LMS e que opere neste ambiente. As simulações mostraram que a abordagem *Bayesiana* foi a

que gerou mapas mais adequados. Um algoritmo de planejamento de rotas tipo A\* indicou o trajeto mais curto e seguro para que um robô móvel pudesse navegar.

Gartchore et al. (2002) centraram o problema da estimativa da localização de um robô autônomo com monovisão à utilização de grades de ocupação. De forma diferente, esta pesquisa aborda o problema através da observação e localização de características na grade de ocupação.

Guivant et al. (2004) apresentaram um novo mapa métrico híbrido (*Hybrid Metric Map - HYMM*), o qual combinou, de forma consistente, mapas de características com mapas de representação métrica. O mapa global foi dividido dentro de um conjunto de regiões triangulares locais e uma rede do tipo *HYMM* permitiu a combinação de um sistema SLAM com um mapa de grades de ocupação.

Gutmann et al. (2005) apresentaram um método de obtenção de mapas de grades tipo “2.5D” (representação bidimensional que leva em consideração uma terceira dimensão ou característica), os quais conseguiram representar o ambiente na qual um robô está inserido. O objetivo deste estudo foi aplicar este método na navegação 3D de robôs bípedes, criando um mapa da altura (2.5D) do ambiente ao redor do robô. O ambiente foi representado em forma de uma grade bidimensional com divisões uniformes (células), cada uma destas divisões armazenou a altura de um obstáculo, ou do piso da área onde está localizada esta divisão (célula). Uma limitação desta abordagem é que, dependendo do tamanho da célula, não é possível representar, na mesma célula, diferentes possibilidades de níveis de altura. Assim, é representada somente a máxima altura, sendo os outros valores considerados irrelevantes para esta navegação. Esta suposição é razoável para ambientes humanos. Quando se pretende utilizar este tipo de mapas é necessário considerar dois aspectos: (i) o sistema não pondera as incertezas das medições (p.e. ruído); (ii) a necessidade de distinguir entre obstáculos e superfícies planas, problema associado à navegação de robôs bípedes (p.e. subir escadas), poderia aparentemente ser superado utilizando mapas com maior definição (menores células). Nos testes deste estudo foram empregadas câmeras estéreo do próprio robô.

Stepán et al. (2003) estudaram a fusão de dados: (i) câmera monocular colorida e (ii) um scanner de dados, a fim de poder construir uma mapa com grades de ocupação.

Queck et al. (2005) apresentaram uma abordagem baseada em *Fuzzy* para os sistema de percepção baseados na geração de características, utilizando um sistema estereovisão. Os mapas das características integraram cor com informação geométrica dentro de uma grade de ocupação para representar, de forma útil, as características extraídas do ambiente percebido.

Diosi et al. (2005) exploraram a interação de um usuário com um robô para criar de forma (semi-) autônoma um mapa “rotulado” do ambiente. O robô seguia um usuário por um determinado trajeto, conforme recebia comentários verbalizados, gerava um mapa métrico utilizando a fusão dos dados (dos sistemas a laser e de ultra-som avançado) em um filtro de Kalman baseado em quadros SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*). Após o mapeamento, o robô gerava uma Grade de Ocupação segmentada dentro de quartos rotulados.

Yamauchi (2006) apresentou alguns avanços do projeto *Wayfarer*, das Forças Armadas Americanas. O veículo terrestre não tripulado (robô equipado com um sistema de visão estéreo 3D, um sistema LIDAR plano de 360°, GPS, INS, compasso e com um sistema de odometria) conseguiu reconhecer ambientes urbanos. A transformada de Hough foi empregada para trabalhar os dados do sistema LIDAR e detectar as paredes dos prédios nas ruas, a fim de seguir uma rota, graças à construção de mapas do ambiente externo (urbano e rural).

Velagic et al. (2006) propuseram uma metodologia de programação computacional, que utilizou vários algoritmos computacionais (lógica *fuzzy*, algoritmos genéticos, teoria de *Dempster-Shafer* - teoria matemática da evidência, etc), aplicados aos sistemas de navegação de robôs móveis. Esta metodologia considerou três sub-sistemas de navegação: i) sub-sistema de nível baixo, que controla, por exemplo, velocidades angulares e lineares; ii) sub-sistema de nível médio, que controla a posição do robô; iii) sub-sistema de alto nível, o qual cumpre as tarefas de: fusão de dados dos sensores utilizados, construção de mapas e planejamento de rotas. A navegação é realizada baseada na construção de um mapa local e representada em uma Grade de

Ocupação, capaz de ser aplicada em tempo real. O algoritmo de planejamento de rotas foi baseado em uma modificação do método do campo potencial.

Michel et al. (2006) apresentaram um sistema *on-line* de reconstrução do ambiente, que utilizou sensores externos de localização global e internos para processos de mapeamento local por robôs humanóides bípedes. Um sistema de captura de movimento óptico foi utilizado a fim de melhorar a localização. Os dados de uma câmera (calibrada) e de um sistema LMS foram integrados para construir mapas do ambiente em 2D, em tempo real. A geometria dos obstáculos foi representada por Grades de Ocupação em 2D e por mapas de elevação do tipo 2.5D.

Fulgenzi et al. (2007), apresentaram uma abordagem da navegação autônoma em ambientes dinâmicos, para isto foi aplicada uma PVO (*Probabilistic Velocity Obstacle*), aproximado para Grades de Ocupação Dinâmica.

Otte et al. (2007) apresentaram outra solução para o planejamento de trajetos locais baseada em estéreo-visão. Diferentemente dos outros sistemas de planejamento baseados em imagens, esta pesquisa utilizou funções de custo especializadas para encontrar rotas através da representação por Grades de Ocupação do ambiente não estruturado, diretamente de uma imagem plana (espaço da imagem).

Schneier et al. (2008) direcionaram a questão de como utilizar os dados dos sensores para apreender propriedades/características do ambiente, e usar este conhecimento para predizer regiões do ambiente possíveis de serem atravessadas (navegáveis). Sensores de distância (estéreo ou LIDAR), câmeras coloridas e sensores para navegação de veículos forma utilizados. Modelos de regiões do terreno foram apreendidos de sub-conjuntos de *pixels* selecionados por projeção dentro de um mapa de ocupação local. Os modelos incluem informações de cor, textura e navegabilidade (tradução livre para *traversability*), obtidas a partir da análise dos dados (distâncias) associados com os *pixels*.

Zhou e Skane (2008) estudaram o problema do mapeamento e localização de um robô móvel em um ambiente que inclui objetos semi-dinâmicos (que mudam sua posição ocasionalmente), como armários de arquivos móveis, cadeiras e portas. Foi pressuposto que estes objetos eram alvo das tarefas do robô e propôs-se uma extensão da técnica SLAM, denominada de SLAM-SD (*Simultaneous Localization And Mapping; in Semi-Dynamic environments*), a fim de lidar com ambientes semi-dinâmicos. O método empregou uma rede bayesiana dinâmica e um filtro de partículas do tipo *Rao-Blackwellised*, atualizando um mapa de Grades de Ocupação quando os objetos semi-dinâmicos mudavam sua posição. Os experimentos foram realizados com ajuda de um robô móvel com sensores do tipo LMS em 2D.

Rocha, Ferreira e Dias (2008) propuseram um método para construir mapas para robôs autônomos móveis ou múltiplos robôs (cooperação), utilizando um algoritmo de exploração local (*hill climbing*). A principal contribuição deste estudo foi a apresentação de um método topológico que garantisse que o ambiente fosse completamente explorado. O método proposto foi utilizado como um módulo para suportar uma missão na qual se desejava explorar um ambiente e construir mapas.

Pacheco et al. (2008; 2009) apresentaram a experiência de um robô móvel com rodas, a fim de poder navegar utilizando um sistema de percepção baseado em monovisão e odometria. Um sistema de percepção local restrito foi utilizado para planejar trajetórias seguras, a fim de alcançar um objetivo. Os dados registrados pela câmera (monovisão) foram utilizados para se obter, em tempo real, informações locais, para a construção de um mapa de grades de ocupação através da integração dos *frames* no tempo. O planejamento da trajetória foi providenciado utilizando a técnica da atração de campos potenciais.

A pesquisa de Otte et al. (2009) apresentou uma nova técnica chamada de “*image space*” para o planejamento de rotas em ambientes externos (*outdoor*) não estruturados. Esta técnica inicialmente operou em grades de ocupação com uma vista do plano, procurando uma rota diretamente nos espaços que existiam dentro da imagem. Também foi apresentada uma extensão deste sistema de planejamento chamada de “*cylindrical planner*”, a qual simulou um campo de

visão de 180°, com uma grade de ocupação de forma cilíndrica. Estas técnicas poderiam ser bem utilizadas em subsistemas de planejamento local.

Nepal et al. (2009) apresentaram o projeto de uma plataforma móvel (UGV) denominada de “Q”, utilizada para desafios de navegação autônoma na *Intelligent Ground Vehicle Competition (IGVC)*. A plataforma foi implementada com um sensor de escaneamento a laser da marca SICK, uma câmera de vídeo, GPS e um compasso digital. Os dados do ambiente eram representados em uma grade de ocupação, que foi convertida em um histograma, o qual analisou a abertura entre os obstáculos. Para cumprir com as tarefas, a plataforma foi implementada com dois algoritmos: (i) VFH (*Vector Field Histogram*) modificado; (ii) JAUS (*Joint Architecture for Unmanned Systems*).

Andert (2009) desenvolveu um método para processar a profundidade de imagens para mapas de Grades de Ocupação. Os dados de entrada foram imagens com informação de distância baseada em *pixels* e sua correspondente imagem da câmera. A saída foi uma “interpretação” da imagem baseada em grades, como a matriz da probabilidade de ocupação, informações armazenadas em uma única imagem. Como parte final dos resultados, foram apresentadas grades de ocupação em 3D a partir de uma sequência de imagens aéreas.

Oniga et al. (2009) apresentaram um método para construir mapas globais com grades de ocupação, apropriados a tarefas de navegação em ambientes urbanos. O método proposto criou três tipos de células (dentro das grades de ocupação): (i) estrada; (ii) “ilhas de tráfego”; (iii) obstáculos. Primeiramente foi realizada uma filtragem das falsas “ilhas de tráfego” presentes nas grades, logo, as células do tipo obstáculo foram divididas em: estáticas (possivelmente estruturas) e dinâmicas. Finalmente, foi gerada uma grade de ocupação “melhorada” (GOM). O mapa global foi construído pela integração desta grade de ocupação “melhorada” ao longo de vários “frames” (Figura 2.9). O robô utilizado nos experimentos estava equipado com um sistema de visão estéreo, um sistema de odometria visual, sensores ego-inerciais e GPS. Foram utilizados DEM (*Digital Elevation Maps*) para representar dados 3D extraídos por visão estéreo.

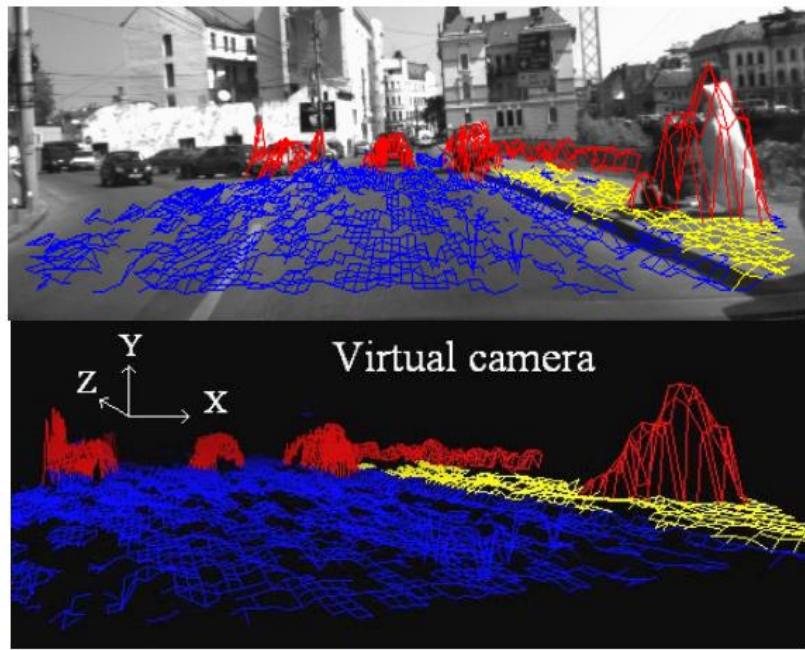


Figura 2.9 - A Grade de Ocupação detectada pelo algoritmo de Oniga et al. (2009), mostrado em 3D: a cor azul representa a estrada, a cor vermelha, os obstáculos, a cor amarela as ilhas de tráfego.

Himmelsbach et al. (2009) descreveu um sistema de percepção baseado em LIDAR para a mobilidade de um robô terrestre. O sistema foi conformado por um sistema de detecção, classificação e seguimento de objetos 3D. A segmentação das nuvens de pontos foi realizada em uma Grade de Ocupação do tipo 2.5D. A classificação dos objetos foi feita a partir das nuvens de pontos 3D, sendo utilizadas as propriedades estatísticas da nuvem de pontos.

Lee et al. (2010) propuseram uma nova abordagem para gerar mapas de Grades de Ocupação e classificar objetos em tempo real, para aplicações em robótica autônoma móvel terrestre. Esta inovadora técnica baseou-se na análise geométrica dos dados de um sistema LIDAR, formulando-se um critério específico para diferenciar pontos 3D diretamente dos valores das coordenadas e gerar, desta forma, três mapas de grades: i) ocupação; ii) terreno; e iii) mapa de dispersão (que corresponde diretamente a hipóteses do tipo de objeto que está sendo percebido). Foram realizadas análises das formas 2D e 3D para verificação da hipótese do objeto.

Schneider et al. (2010) aprofundaram a pesquisa sobre a fusão de dados de múltiplos sensores na robótica móvel. As câmeras e os sensores tipo LIDAR podem se complementar em termos de percepção de cor e profundidade. A fusão de ambos sensores possibilita obter imagens coloridas com informações de profundidade e refletância, assim como nuvens de pontos LIDAR 3D com informações coloridas. Neste trabalho foi proposto um método para sincronização de sensores especialmente projetados para cenários dinâmicos, bem como uma solução para o problema de oclusão.

Wurm et al. (2010) contribuíram com uma abordagem diferente, a fim de permitir melhorar o desempenho de um sistema SLAM. Nesta abordagem, um robô móvel pode utilizar simultaneamente diferentes representações do ambiente, por exemplo, combinando modelos baseados em características com mapas de grades de ocupação.

Nieuwenhuisen et al. (2010) aprofundaram a pesquisa do problema de mapeamento e localização de robôs autônomos em ambientes estruturados (*Indoor*), abordando a utilização de portas como sendo uma característica importante do ambiente. O método utilizado “melhorou” o mapa de Grades de Ocupação com modelos parametrizados de portas, isto permitiu melhorar significativamente o processo de localização. Para localização global, a medição (reconhecimento) de portas pode reduzir as ambiguidades do ambiente e o robô poderá se auto-localizar mais rapidamente e robustamente.

Kang et al. (2010) apresentaram um robusto e confiável método para reconhecimento e planejamento de rotas de forma estratégica. Uma plataforma robótica (MORIS) com sensores (LMS, câmera estéreo, giroscópio, etc) enfrentou o desafio de ir de um corredor até um elevador (tarefas de reconhecimento e navegação) dentro de um ambiente estruturado (AE). Para tal é utilizada uma rede neural artificial, método de seguimento e um algoritmo de planejamento de rotas para navegação dentro e fora do elevador, construindo um mapa com Grades de Ocupação. Para a estratégia de conseguir a melhor rota, foi utilizado o método dos campos potenciais. Todos os cenários possíveis foram simulados (vazio, cheio, bloqueado).

Yang e Wan (2011) propuseram uma variante dos mapas baseados em grades. Uma grade de viabilidade (*feasibility grids*) foi proposta, integrando informações dos objetos em movimento no mapeamento. Esta variante permitiu também a utilização direta de dois modelos de sensores. Ao invés de estimar os estados de ocupação, uma grade de viabilidade armazenou as estimativas estocásticas dos estados de viabilidade do ambiente. Considerando que uma “observação” por parte do sistema de percepção pode ser decomposta em objetos estacionários e em movimento, os autores garantem que incorporar grades de viabilidade no processo de localização permite um ganho no desempenho em relação às Grades de Ocupação, principalmente em ambientes altamente dinâmicos.

Souza e Gonçalves (2012) propuseram um novo método para mapeamento de ambientes com informação visual em 3D. Para isso foi introduzido um mapeamento por Grades de Ocupação-elevação como uma abordagem discreta, na qual cada célula armazenava a “ocupação probabilística”, a altura do terreno no lugar, assim como a variação desta altura. Esta representação “2.5D” (devido a conter/relacionar uma terceira dimensão intrínseca às outras duas dimensões) permitiu que o robô móvel percebesse se o lugar no ambiente de navegação estava ocupado por um obstáculo e qual a altura do mesmo.

Moras et al. (2012) apresentaram um método de percepção que utilizou um *scanner* a laser de múltiplas camadas, acoplado ao pára-choque dianteiro de um veículo. Logo, foi aplicado um processamento por grades de ocupação, a fim de detectar e localizar os objetos que estavam ao redor do ambiente.

Stoyanov (2012) propôs um método de avaliação para comparar a consistência de diferentes modelos de representação do ambiente, em particular os modelos espaciais mais comuns (probabilísticos) capacitados para predizer o grau de ocupação de um determinado ponto no espaço, com medições do tipo 3D. Conjuntos de dados simulados e reais foram usados para aferir a precisão de quatro modelos: mapas de grades de ocupação, malha de triângulos e duas variações do *3D-NDT* (*Three-dimensional Normal Distributions Transform*) (Figura 2.10).

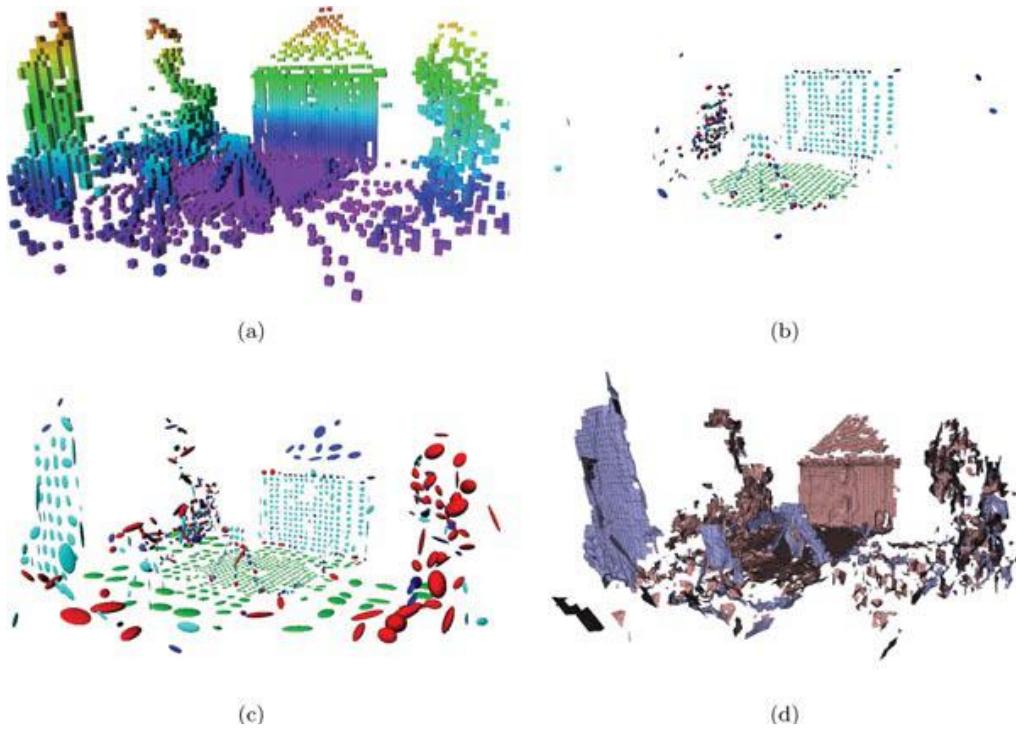


Figura 2.10 - Modelos de representação espacial, construídos a partir de um conjunto de pontos gerados por um sistema LIDAR, com nível de discretização de 0,2 m: (a) Modelo do tipo grade de ocupação; (b) modelo com grade de discretização tipo 3D-NDT; (c) modelo com discretização tipo “Octree” 3D-NDT; e (d) modelo de malha triangular (STOYANOV, 2012).

### **3 SISTEMA DE PERCEPÇÃO LIDAR-3D**

Como foi apresentado anteriormente, sistemas autônomos de navegação podem ser estruturados em três camadas principais: Percepção, Navegação e Controle, como apresentado na Figura 1.4a. Esta divisão facilita o desenvolvimento destes subsistemas, principalmente quando se trabalha em equipe. É importante ressaltar que não existe uma arquitetura padrão que defina os sistemas móveis, mas sim uma generalização das etapas comuns a estes sistemas (OCHO-DIAZ, 2010).

Qualquer que seja a representação (abstrata) do sistema, a primeira etapa caracteriza-se pela Percepção, realizada a partir do sensoriamento do ambiente. Um sistema de percepção, em geral para sistemas robóticos, coleta dados do ambiente e os representa em um mapa local (modelo que representa o ambiente). Esse mapa pode servir de auxílio a um sistema gerador de trajetórias ou a um condutor (no caso de sistemas semi-autônomos).

No geral, a percepção é definida como um processo de captura de informações do ambiente no qual o robô está inserido. Este reconhecimento é feito por meio de sistemas sensoriais, que podem ser classificados, segundo Siegwart e Nourbakhsh (2004), em dois tipos:

- Sensores proprioceptivos: medem valores internos do sistema robótico, por exemplo, a rotação de um motor, os ângulos das juntas de um braço robótico, estado das baterias, etc.
- Sensores exteroceptivos: encarregados de adquirir informações ambientais, como distância entre o robô e objetos, detecção de certos padrões ou características no ambiente.

A pesquisa no contexto desta tese de doutorado caracteriza-se pelo estudo e desenvolvimento de um sensor exteroceptivo baseado em LIDAR, propondo uma plataforma de percepção 3D. Desta forma, a seguir são apresentados: (i) Princípio de funcionamento dos

sensores de percepção por visão LIDAR em três dimensões; (ii) Mapeamento 3D aplicado aos sistemas de navegação (semi-) autônoma; (iii) Desenvolvimento do sistema de percepção LMS-3D.

### **3.1 Princípios de funcionamento da Percepção LIDAR em 3D**

Imagens em três dimensões podem ser percebidas de três formas: (i) Método de medição de profundidade baseado na medição do tempo de vôo (*time-of-flight*); (ii) Triangulação de pontos correspondentes, resultando na estimativa de profundidade; (iii) Aquisição da profundidade a partir de uma imagem simples, empregando-se conhecimentos prévios. No contexto do presente trabalho, os dois primeiros métodos são os mais adequados para o sistema proposto.

#### **3.1.1 Medições por tempo de vôo (*time of flight*)**

A medição por tempo de voo consiste em medir o atraso entre um sinal emitido e o seu retorno ao emissor/receptor. Utilizando o tempo medido “*t*” e a velocidade “*v*” do sinal, a distância total percorrida “*s*” por este sinal será dada pela seguinte Equação (3.1):

$$s = v \cdot t \quad \dots(3.1)$$

Usualmente, o receptor está conectado (ou próximo) ao emissor. Pode-se assumir, portanto, que a distância receptor-objeto seja igual à distância objeto-emissor (ver a Figura 3.1). Consequentemente, a distância “*D*” para o objeto será:

$$D = v \frac{t}{2} \quad \dots(3.2)$$

A velocidade do som no ar (*v*) é igual a 343 m/s, enquanto que da luz no vácuo (*c*) é de 299.792.458 m/s. Sendo esta última velocidade muito alta, para questões de medição, será necessário um relógio preciso (da ordem de pico-segundos), para se poder “perceber” distâncias de 1 cm (Equação 3.3).

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{c} = \frac{0,01m}{299.792.458 \frac{m}{s}} = 33,4 \cdot 10^{-12} s \quad ... (3.3)$$

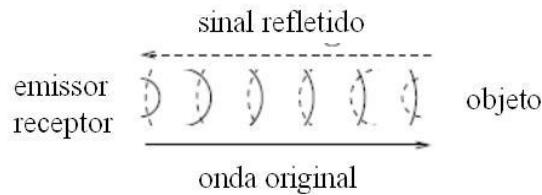


Figura 3.1 - Princípio de funcionamento, medições do tempo de vôo, os sinais emitidos pelo emissor e refletidos dos objetos são detectados pelo receptor.

### 3.1.2 Medições por comparação de fase (*phase-shift*)

Este método consiste em enviar um feixe laser de modo contínuo, modulado de forma senoidal, e comparar a fase da onda emitida com a fase da onda de retorno correspondente, proveniente do alvo. Um diagrama de blocos deste tipo de medidor é apresentado na Figura 3.2.

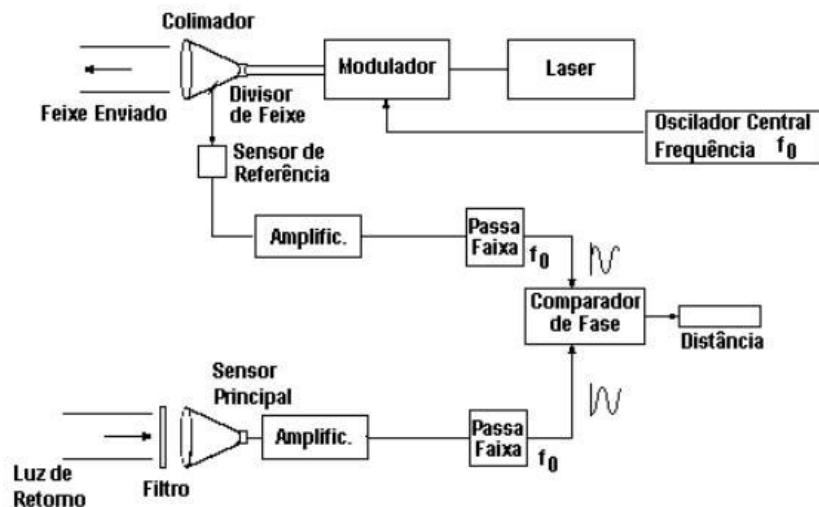


Figura 3.2 – Diagrama modular de um medidor de distância por comparação de fase (NETTO, 2000).

O feixe de um emissor laser é modulado senoidalmente por meio de um modulador externo, ou mesmo na alimentação do laser, como nos lasers semicondutores. O feixe é então colimado e enviado na direção do alvo. Uma pequena parcela deste feixe transmitido é desviada para um sensor de referência, fase  $0^\circ$ . A luz refletida pelo alvo é captada através do telescópio coletor e dirigida ao sensor principal, no qual o sinal é então amplificado, filtrado e a sua fase é comparada com a referência (NETTO et al., 2000).

Se a modulação for efetuada na frequência  $f$ , pode-se associar um comprimento de onda de modulação  $\lambda$ , na qual  $c$  é a velocidade da luz no meio:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \dots(3.4)$$

Dessa forma, se a distância percorrida for um múltiplo de  $\lambda$ , as ondas terão a mesma fase,  $\Delta\phi = 0$ . Caso contrário, existirá uma diferença de fase  $\Delta\phi$ , correspondente a uma distância percorrida excedente  $d$ . Assim, pode-se estimar que a distância total é:

$$D = \frac{c}{f} \left( \frac{n}{2} - \frac{\Delta\phi}{4\pi} \right) \quad \dots(3.5)$$

Não é possível determinar  $n$  e, consequentemente  $D$ , apenas pela comparação de fase  $\Delta\phi$ . Por esta razão, nos medidores comerciais, a frequência de modulação  $f$  é alterada periodicamente em 2 ou 3 valores distintos de maneira que, por meio de processamento matemático, se encontre uma solução única de  $(n, \Delta\phi)$ . Geralmente, adotam-se duas frequências de modulação: uma alta (para altas resoluções) e outra baixa (para medição de grandes distâncias). A Figura 3.3 apresenta este princípio: o sinal de medição é modulado com dois sinais (NUCHTER, 2009).

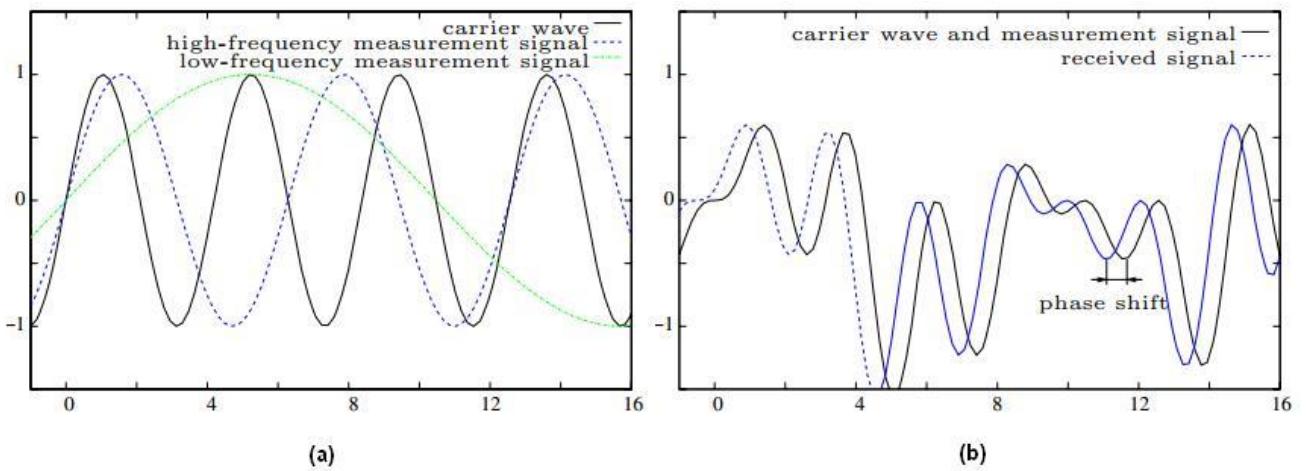


Figura 3.3 – Modulação das amplitudes: (a) onda portadora, sinal de medição de baixa e alta frequência, (b) superposição do sinal portador e dos sinais de medição com a correspondente onda refletida (NUCHTER, 2009).

### 3.1.3 Triangulação

Distâncias podem ser medidas também por triangulação. Neste sistema, o emissor emite um sinal e o receptor, que está a uma distância  $L$  do emissor, detecta o sinal com um desvio  $x$ , utilizando uma câmera *pinhole* (câmera simples, sem lente e com uma pequena abertura, permitindo que os raios de um objeto passem através da abertura para formar uma imagem invertida). Com base no desvio  $x$ , a distância é calculada pela seguinte fórmula:

$$D = f \frac{L}{x} \quad \dots(3.6)$$

O modelo da câmera *pinhole* permite o cálculo acima, uma vez que o teorema da intersecção de linhas pode ser aplicado. A Figura 3.4 esquematiza o princípio da triangulação.

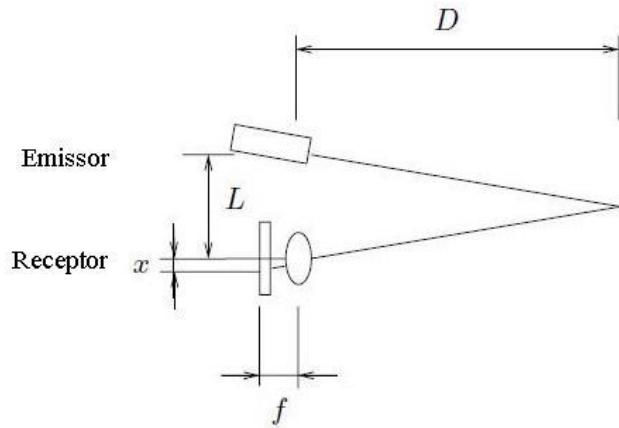


Figura 3.4 - Princípio de funcionamento dos medidores de distância por triangulação.

## 3.2 Scanner a Laser

Na última década, os *scanners* a laser surgiram como uma nova tecnologia. Atualmente sua aplicação mais comum é a da medição de distâncias. Um método de escaneamento é comumente empregado para digitalizar superfícies, utilizando um mecanismo para mover ou rotacionar o sistema de medição. Alternativamente, espelhos rotativos são utilizados para mudar a direção do feixe do laser.

Os *scanners* a laser mais comuns geralmente medem a distância por meio de duas técnicas: cálculo do tempo de voo e diferença (ou comparação) de fases. Além disso, pode-se destacar, dentro dos sistemas de percepção 3D baseados em visão laser, os sistemas de mapeamento móvel em tempo real (HUNTER et al., 2006).

Os sistemas de medição a laser 1D podem ser definidos, de forma muito simples, como sendo sistemas de medição do tipo LMS (*Laser Measurement System*), que emitem um feixe de luz para conseguir mensurar (através de um cálculo), em um determinado momento, uma única distância. Geralmente estes dispositivos possuem um porto serial ou *Bluetooth*, por onde transmitem seus dados para um computador.

### 3.2.1 Scanner a laser 2D

*Scanners* a laser 2D podem ser entendidos como uma extensão dos sistemas 1D. Para escanear uma linha, um espelho é rotacionado de tal forma que o feixe do laser seja capaz de medir distâncias nas diferentes direções. Os ângulos de abertura deste sensor são geralmente de:  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  ou  $360^\circ$ , podendo ter resoluções de:  $1^\circ$ ;  $0,5^\circ$  e até  $0,25^\circ$ . A Figura 3.5 apresenta dois *scanners* da marca SICK comumente utilizados na robótica. Existem limitações para a utilização destes dispositivos, advindos das próprias características do equipamento, e do ambiente no qual se pretende realizar as medições (limite de distância, grau de periculosidade do feixe, medições falsas devido a problemas de reflexão do sinal por superfícies refletivas, etc).



Figura 3.5 – *Scanner* a Laser tipo industrial da marca SICK: (a) LMS 291 (*outdoor*, campo de visão:  $180^\circ$ ; resolução angular:  $0,25^\circ$ ,  $0,5^\circ$  e  $1^\circ$ ; alcance: 30 m); (b) LMS 111 (*outdoor*, campo de visão:  $270^\circ$ ; resolução angular:  $0,5^\circ$  e  $1^\circ$ ; alcance: 20 m).

### 3.2.2 Scanner a laser 3D

*Scanners* a laser 3D são uma extensão dos sistemas 2D com um grau de liberdade adicional, que poderia ser fornecido por um segundo espelho, a partir da rotação de um *scanner* 2D. A Tabela 3.1 apresenta possíveis configurações (adaptações) do *scanner* 2D para aquisição de dados em 3D. Esta configuração gera algumas vantagens e desvantagens, dependendo da configuração proposta. A Figura 3.6 apresenta dois exemplos de nuvens de pontos 3D, obtidos

com dois diferentes métodos de escaneamento, de acordo com cada configuração. As diferentes densidades dos pontos, assim como os diversos “cortes” da digitalização podem ser apreciados. Scanners a laser 3D representam o estado-da-arte das ferramentas em aplicações geodésicas. No contexto da robótica móvel são conhecidos como LIDAR ou LADAR (do inglês, *Laser Detection and Ranging*).

Tabela 3.1 – Configurações para scanners 3D (NUCHTER, 2009), utilizando um *scanner* SICK, a ser utilizado no presente trabalho.

Modo	Símbolo	Rotação continua	Inclinação	Vantagens (+) e desvantagens (-)
<i>Yaw</i>				<ul style="list-style-type: none"> <li>+ escaneamento completo de 360°;</li> <li>- alta densidade de pontos nas partes alta e baixa;</li> <li>+ bom arranjo de pontos utilizando um <i>scanner</i> com um ângulo de abertura de 90°;</li> </ul>
<i>Yaw-top</i>				<ul style="list-style-type: none"> <li>+ tempo de escaneamento rápido, uma vez que media rotação é suficiente;</li> <li>+ alta densidade de pontos na direção da visualização do <i>scanner</i>;</li> <li>- somente a metade do espaço é possível de ser escaneado;</li> </ul>
<i>Roll</i>				<ul style="list-style-type: none"> <li>+ tempo de escaneamento rápido, uma vez que media rotação é suficiente;</li> <li>+ alta densidade de pontos na direção da visualização do <i>scanner</i>;</li> <li>- somente a metade do espaço é possível de ser escaneado;</li> </ul>
<i>Pitch</i>				<ul style="list-style-type: none"> <li>- alta densidade de pontos nos lados do <i>scanner</i></li> <li>- somente uma pequena fração do espaço é possível de ser escaneado</li> </ul>

Para os sistemas de navegação autônomos, os *scanners* a laser fornecem principalmente medições de distâncias (do sistema aos objetos). Estas medições definem/caracterizam o ambiente da navegação. Para o desenvolvimento do sistema de percepção LMS-3D, objeto do

presente trabalho, foi selecionada a configuração do tipo “Yaw”, como uma primeira configuração a ser testada e construída. Suas principais vantagens são: possibilitar uma rotação de 360° no plano horizontal (resolvendo o problema de enroscar os cabos das conexões); geração de uma alta densidade de pontos acima e embaixo do sensor (na tabela é indicada como desvantagem), dando uma percepção do ambiente em quase sua totalidade (inclusive acima e abaixo do próprio sensor); bom arranjo de pontos, quando utilizado um sensor com abertura de 90°. A escolha da configuração do sensor a ser desenvolvido teve como base atender aos seguintes requisitos: (i) representação de um ambiente completo (360°); (ii) maior definição possível, utilizando um sensor 2D.

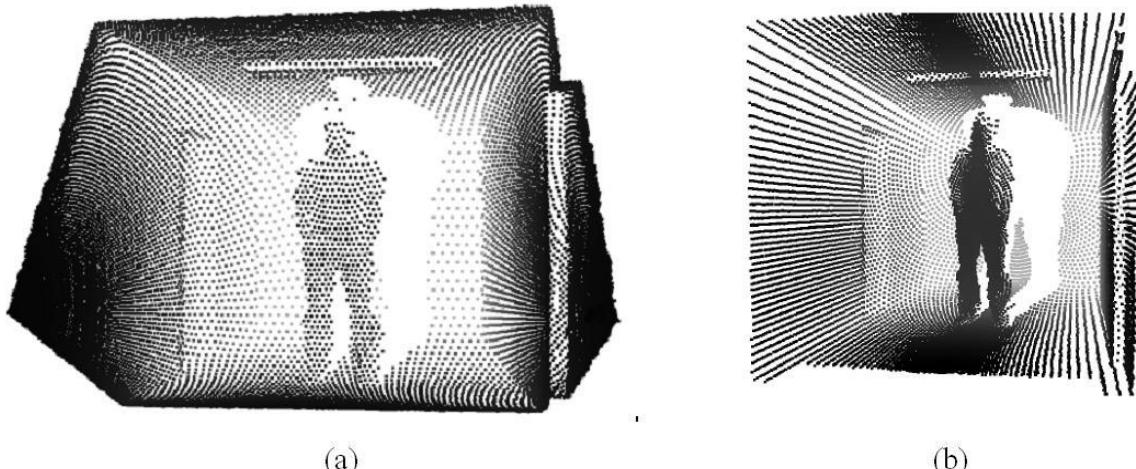


Figura 3.6 – Nuvens de pontos 3D produzidos por 2 métodos de escaneamento: (a) *scanner pitching*; e (b) *scanner yawing* (NUCHTER, 2009).

### 3.2.3 Scanner de projeção 3D

O escaneamento 3D por projeção precisa de uma câmera (monovisão) e de uma projeção padrão (p.e. pontos ou linhas de luz projetadas desde um laser) e utiliza o princípio da triangulação. Uma figura padrão é projetada para um determinado cenário e é “capturada” por uma câmera. Caso este padrão seja um *spot* de laser, tem-se um sistema de medição a laser 1D com câmera. No caso de ser uma linha, dados 2D poderão ser extraídos. Um padrão planar pode produzir um *scanner a laser 3D*. Na Figura 3.7, um exemplo é apresentado de forma detalhada.

O cálculo da profundidade é realizado aplicando-se a fórmula de triangulação (Equação 3.7), tendo como requisito uma etapa de calibração (*setup*), a qual define os parâmetros intrínsecos e extrínsecos da câmera em relação à fonte de luz. Alternativamente, a profundidade, no caso 2D, pode ser calculada com o ângulo  $\alpha$  e a disparidade  $x$  na imagem da câmera. Se a posição da câmera em relação à fonte de luz é desconhecida, informações complementares (da imagem) podem ser utilizadas para calcular o plano da luz laser, como objetos de dimensões conhecidas, esquinas (a ângulos padrões) ou utilizar duas linhas laser projetadas ortogonalmente dentro do cenário (KAWASAKI & FURUKAWA, 2007). O cálculo da profundidade (ou distância a um objeto) por este simples método hoje é promissor em ambientes urbanos, principalmente devido ao baixo custo das câmeras (monovisão).

$$H = x \tan(\alpha) \quad \dots(3.7)$$

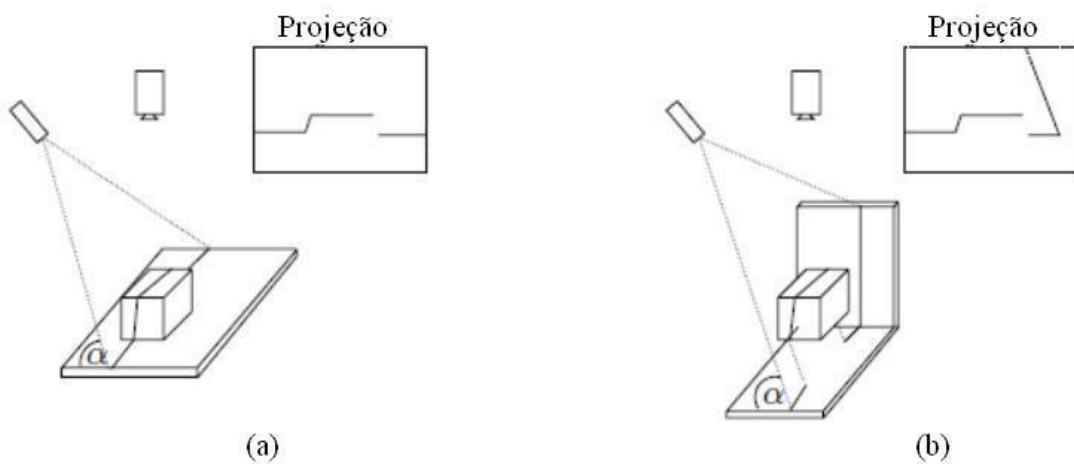


Figura 3.7 – Informações 3D podem ser calculadas baseadas na projeção de uma linha (a) a um ângulo conhecido; (b) esquinas pré-definidas, podem ajudar a calcular a profundidade, caso o ângulo de projeção seja desconhecido (NUCHTER, 2009).

### 3.2.4 Aplicações do Scanner a laser 3D

A Geodésia tem desenvolvido os chamados TLS (*Terrestrial Laser Scanning*) como um campo independente. Todos os ambientes e objetos podem ser digitalizados em 3D. *Scanners* que

utilizam o princípio da defasagem, conseguem uma alta precisão e altas taxas de dados, p. e., o *scanner* IMAGER 5006, da empresa *Zoller-Fröhlich*, consegue digitalizar até 500 mil pontos por segundo. Sistemas de medição baseados na tecnologia do laser pulsado (*pulsed laser technology*) conseguem medir grandes distâncias (p.e., o *scanner* Riegl LMS-Z420i detecta objetos a uma distância de 1000 m).

*Scanners* 3D baseados em laser são empregados em: planejamento de cidades, ações de polícia e de resgate; medição em minas subterrâneas e túneis (ZHANG et al., 2008); manutenção de estradas e de cabos de transmissão de energia elétrica, telefônicos (LAMON, 2005), etc.

A alta precisão dos sistemas LIDAR eleva os custos, inviabilizando o uso deste tipo de solução para a maioria dos projetos na robótica. Uma tendência recente é o conhecido *k-TLS* (*Kinematic Laser Scanning*). O *scanner* é montado sobre uma plataforma móvel (p.e. carro) e utilizado no modo *scanner* 2D. Enquanto a plataforma se movimenta de forma controlada (posicionamento/odometria), pode-se gerar dados 3D (NUCHTER, 2009). No entanto, é importante ressaltar que a precisão dos dados 3D depende da precisão da informação do posicionamento da plataforma.

A Figura 3.8 apresenta brevemente algumas aplicações mais interessantes na área das ciências aplicadas (engenharias), em destaque, o Mapeamento e Monitoramento (M&M) de outros sistemas ou elementos.

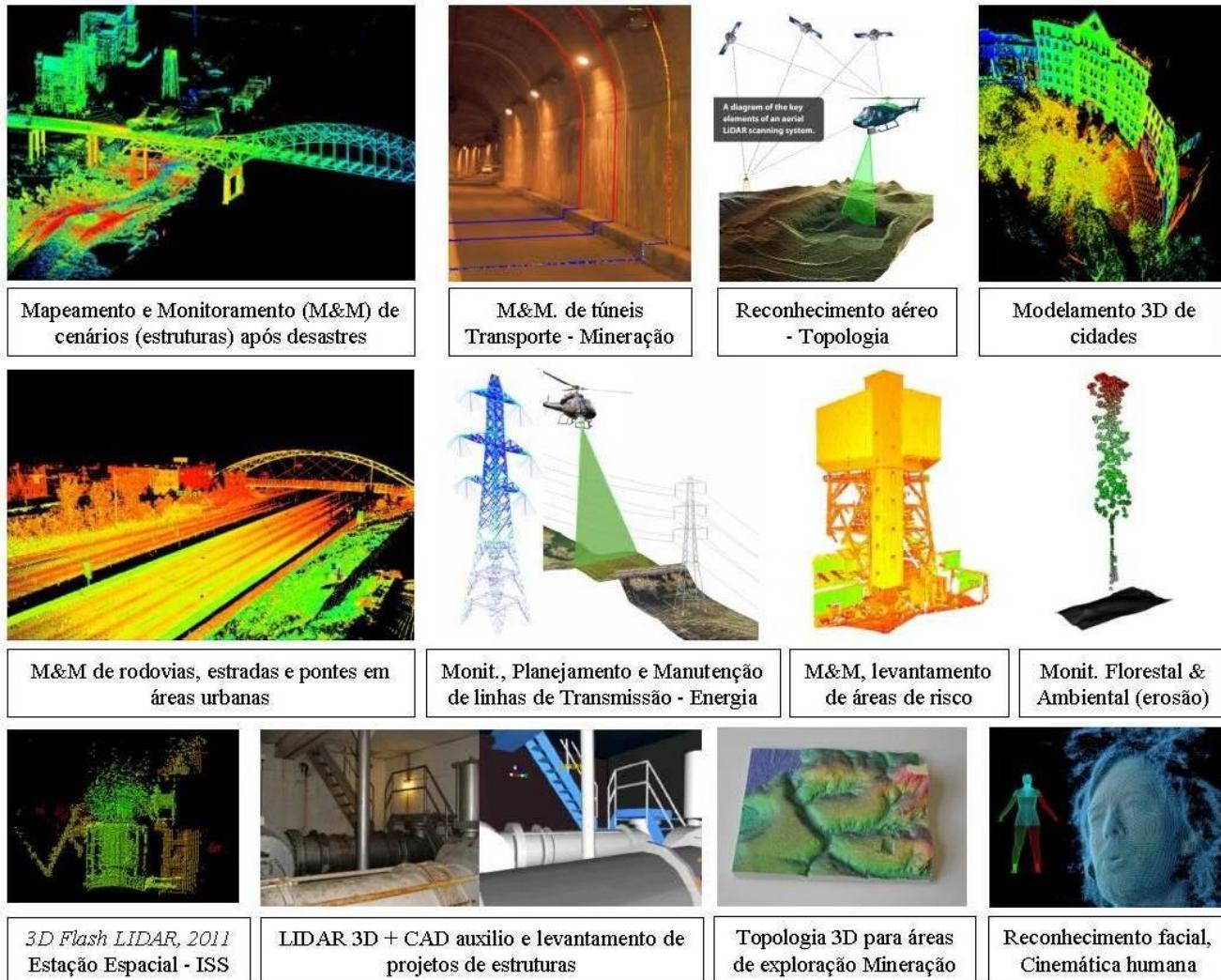


Figura 3.8 – Aplicações para os sistemas LIDAR-3D (algumas figuras foram extraídas do site: [www.network-mapping.com](http://www.network-mapping.com))

### 3.3 LIDAR-3D nos Sistemas Móveis (Semi)-Autônomos

Como descrito anteriormente, LIDAR é a técnica que permite mensurar distâncias, desde um emissor laser a um objeto qualquer. Quando o LIDAR é usado em uma configuração 3D, é definido por Zhang et al. (2008), como um novo sistema ativo de sensoriamento, o qual pode operar à noite e escanear milhares de pontos para gerar um conjunto de dados 3D dos objetos presentes no ambiente.

No mercado existem poucos *scanners* 3D comerciais de longo e médio alcance, os quais são, basicamente, das marcas: *SICK*, *Callidus*, *Leica*, *Mensi*, *Riegl*, *Optech* e *I-Site*. *Callidus*, *I-Site*, *Mensi* e *Riegle* utilizam espelhos para realizar o escaneamento vertical. O escaneamento que completa os 360° no eixo horizontal depende da ação de um servo motor como mostrado na Figura 3.9 (Zhang et al., 2008). Entretanto, todos apresentam um custo elevado.

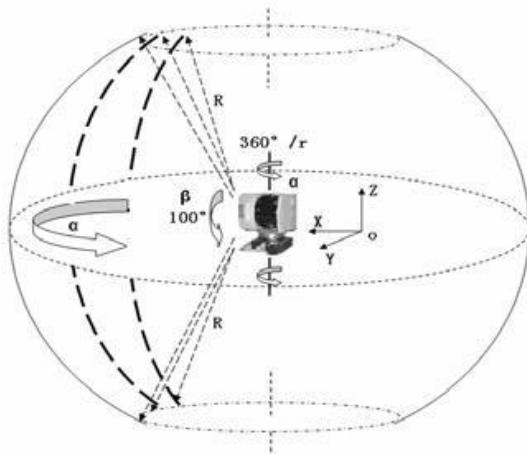


Figura 3.9 - Princípio de funcionamento do protótipo *scanner* portátil a laser 3D desenvolvido na China por Zhang et al. (2008).

O surgimento desta tecnologia é relativamente novo e as inúmeras possibilidades de utilização permitem constantes inovações e melhorias. Como descrito na introdução, o estado-da-arte deste tipo de dispositivo é representado pelo *Velodyne HDL-64E*.

Vários tipos de sistemas baseados no *scanner* 3D a laser têm sido construídos (TALAYA et al., 2004; GRINSTEAD et al., 2005; PFAFF et al., 2007; HUNTER et al., 2006). Muitos deles são principalmente instalados para representar ambientes reais, como pode ser visto na Figura 3.10.

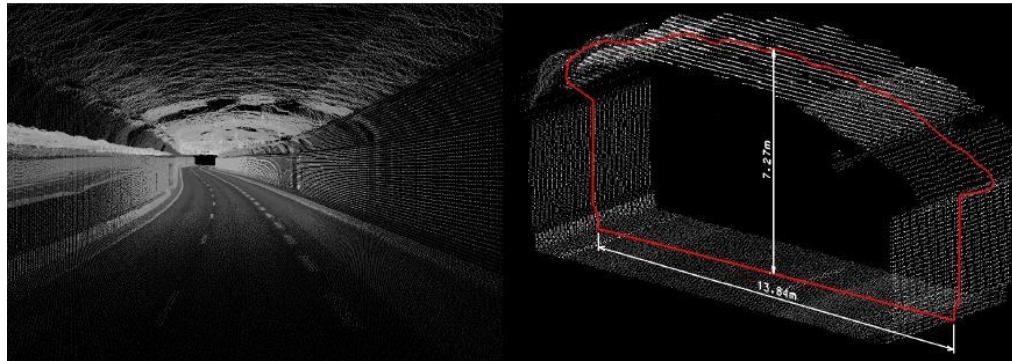


Figura 3.10 - Percepção do *scanner* a laser 3D dentro de um túnel, figura original de Hunter et al. (2006).

Dentro do contexto dos desafios propostos pelo DARPA-EUA a equipe alemã *Spirit of Berlin*, com ajuda da *Fraunhofer Society* - IAIS (Instituto de análises inteligentes e sistemas da informação), desenvolveu e utilizou sensores tipo *scanners* a laser 3D (TEAM BERLIN, 2007).

### 3.3.1 Modelagem do ambiente utilizando LIDAR 3D

O posterior mapeamento LIDAR 3D depende da exata determinação de posição e orientação do *scanner* a laser 3D durante a aquisição dos dados (HUNTER et al., 2006). Tais dados são determinados com ajuda de outros sistemas como: sistemas de posicionamento global (GPS), Unidade de medição inercial (IMU), Diferencial GPS (DGPS), *encoders*, etc.

A unidade de mapeamento 3D cria um mapa local, baseado nos dados fornecidos pelo módulo *scanner* a laser 3D, que pode ser conectado topologicamente por um módulo de localização. Em paralelo, um Mapa on-line Local transversal é gerado e pode ser empregado no planejamento local. Mapas de superfície probabilística multi-nível – MLS maps (mapas de

elevação) foram utilizados por Lamon et al. (2006), a fim de representar, de forma compacta, múltiplas superfícies no ambiente.

Além do LIDAR 3D (Detecção e Medição de Imagens 3D por laser), outros nomes também são associados a esta técnica, destacando-se para a área da navegação robótica: SLAM-3D (Mapeamento e localização Simultânea em 3D) e 3DLS (*Scanner* a laser 3D).

Em função do que foi apresentado anteriormente neste trabalho, foram traçados os seguintes objetivos, a fim de favorecer o desenvolvimento do Sistema de Percepção por LIDAR 3D:

- Estudo da utilização de sensores a LASER e suas diferentes configurações (LIDAR, SLAM, 3DLS), visando à integração com visão computacional (em específico monovisão);
- Proposta, desenvolvimento e implementação de um dispositivo LMS tipo 3D, utilizando um *scanner* SICK LMS 291-05;
- Desenvolvimento da interface (software) de aquisição, controle e pós-processamento de dados do Dispositivo LMS-3D, (LMS-291 e plataforma posicionadora) a ser empregado no mapeamento de ambientes;
- Desenvolver uma ferramenta modular e versátil, a fim de possibilitar futuros trabalhos na área de integração (fusão) de sensores.

### **3.4 Proposta para o desenvolvimento do Módulo LMS-3D**

Todos os objetivos do presente trabalho envolvem o desenvolvimento de um protótipo de sensor tipo LIDAR-3D, definido como Módulo do “Sistema de Medição a Laser para 3D”

(tradução livre do inglês: *Laser Measurement Systems for 3D*), o qual é abreviado por Módulo LMS-3D.

O Módulo LMS-3D integra vários dispositivos e é composto, principalmente, por um sensor medidor de distâncias a laser SICK LMS 291-05 e por uma plataforma posicionadora desenvolvida pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Mobilidade Autônoma (LMA) do Departamento de Mecânica Computacional (DCM) da UNICAMP. Este módulo é composto por componentes eletrônicos, tais como: placas controladoras, motor de passo, *encoder*, estrutura mecânica (engrenagem, pinhão, etc) e também por programas ou sub-rotinas desenvolvidas para controlar e integrar todas as partes.

A seguir é apresentada uma descrição detalhada do desenvolvimento desta proposta:

A.- Primeira Etapa: Hardware, elaboração do projeto e compra de materiais.

- Pesquisa e levantamento Bibliográfico para identificar o estado-da-arte no que diz respeito ao tipo de dispositivo *scanner* a Laser 3D.
- Elaboração do projeto proposto para o desenvolvimento do sensor LIDAR 3D.
- Seleção e compra dos materiais: placas controladoras, motor de passo, *encoder*, otimização do *design* da estrutura mecânica.
- Cursos de Capacitação para operar o laser LMS-291-05 de forma segura. Outros cursos necessários para programação dos programas principais e para programar as placas controladoras baseadas no microcontrolador PIC.

B.- Segunda Etapa: Desenvolvimento do software em dois ambientes diferentes, o MATLAB e o C#. Esta decisão se deu devido à necessidade de se ter uma ferramenta aberta e de fácil manipulação.

- Aprendizado e desenvolvimento de um programa/software baseado no “*Toolbox Sick LIDAR Matlab/C++*”, desenvolvido pelo laboratório GRASP da Universidade de Pensilvânia, este “*Sicktoolbox*” é um *software* de código aberto com Licença BSD *Open-Source*.
- Desenvolvimento de um programa próprio em MATLAB, nomeado como LMS23 (*Laser Measurement Systems Software 3D*) na versão 1.1, que visa dar suporte necessário à leitura do *scanner* LMS-291, via RS232, com a placa controladora do movimento do motor de passo e a placa leitora do *encoder*. Este *software* armazena, de forma otimizada, as distâncias medidas em cada “ponto” da plataforma posicionadora. Cabe salientar que o desenvolvimento foi possível graças ao estudo do *software* de configuração LMSIBS (para dispositivos SICK da série LMS-2XX) e do “Telegrama de Configurações e Operações dos dispositivos LMS-2XX”.
- Testes e Resultados

C.- Terceira Etapa - *Firmware*. Foi proposto um módulo LMS-3D com uma placa eletrônica (baseada no microcontrolador PIC), permitindo a integração da placa controladora do motor de passo e da leitora do *encoder*. Este módulo também possibilita o controle do sensor LMS-291, dentro de uma sub-rotina, permitindo assim a total integração do sistema. Esta placa, junto com o *software* que a controla, facilitará futuras aplicações.

### **3.5 Seleção dos Materiais**

O Módulo LMS-3D integra um sensor medidor de distâncias a laser LMS 291-05 com outros dispositivos eletrônicos formando a Plataforma Posicionadora 3D. Nos Anexos A, B, C, D e, que constam no final da tese, são detalhados os principais dispositivos utilizados nesta Plataforma Posicionadora. O Módulo “*Sb Power Step*” (Anexo A) permite o controle milimétrico

do Motor de passo (Anexo C). O módulo “*Sb Powerboard*” (Anexo B) é o modulo “observador” da plataforma, através do *Encoder* (anexo D).

Quanto à seleção dos materiais, pode-se concluir o seguinte:

- Os módulos, tanto para leitura do *encoder* como do controle do motor de passo, foram selecionados pela disponibilidade do produto bem como pela melhor relação custo benefício ao projeto, visto que este sempre visou construir um módulo LMS-3D, comercialmente acessível.
- O *encoder* foi dimensionado de acordo com o projeto do dispositivo mecânico feito na Oficina do Laboratório do Departamento de Mecânica Computacional (FEM-UNICAMP) e adaptado com um acoplamento flexível, comprado já dimensionado.
- O dispositivo mecânico é formado por uma engrenagem de 37 dentes e um parafuso sem fim. O acionamento do motor via acoplamento flexível, foi feito diretamente neste parafuso que estava suportado por rolamentos. A engrenagem está suportada por dois rolamentos nos extremos, um dos lados do eixo que atravessa a engrenagem se acopla diretamente no eixo vazado do *encoder* (fixada) e se une à plataforma de suporte do laser LMS-291.
- Foi adquirido um tripé completo de marca Manfrotto e adaptado o dispositivo de segurança do mesmo ao dispositivo mecânico construído na oficina do laboratório do DMC.
- Foram testadas todas as placas e os dispositivos separadamente.

### 3.6 Scanner de Medição a Laser LMS-291 05

Os *scanners* a laser são sistemas de medição sem contato. Um pulso de luz (*spot*) é emitido a cada  $0,25^\circ$ ,  $0,5^\circ$  ou  $1^\circ$  (resolução angular), dependendo do tipo e configuração de sensor. O espelho do *scanner* realiza um movimento de  $180^\circ$  (detalhe na Figura 3.11a), o equipamento calcula a distância do emissor (LMS) a cada um dos pontos refletidos pelos objetos, armazenando ou enviando estes vetores (de forma cartesiana ou polar) à interface.

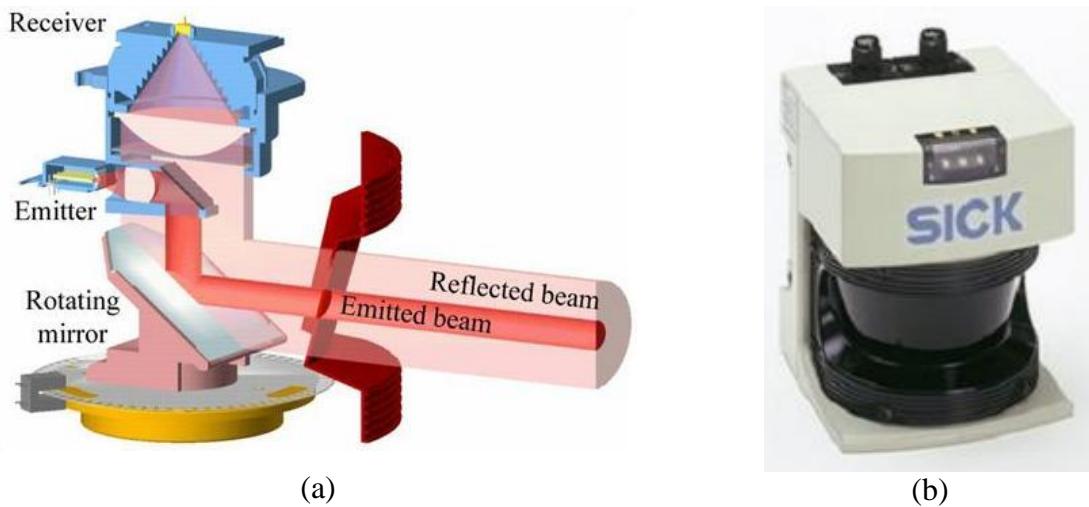


Figura 3.11 – SICK LMS 291-05: (a) Detalhes dos principais componentes internos; (b) vista externa do sensor.

O sensor SICK LMS-291 05 (Figura 3.11b) foi selecionado para o desenvolvimento do Sistema de Percepção LMS-3D, devido às características técnicas apresentadas na Tabela 3.2.

Para caracterizar o sensor, o comportamento deste foi analisado em um determinado campo de visão – FOV (do inglês *field of view*). A Figura 3.12 mostra o diâmetro do *spot* e o espaçamento entre estes raios como função da resolução angular e da distância do sensor.

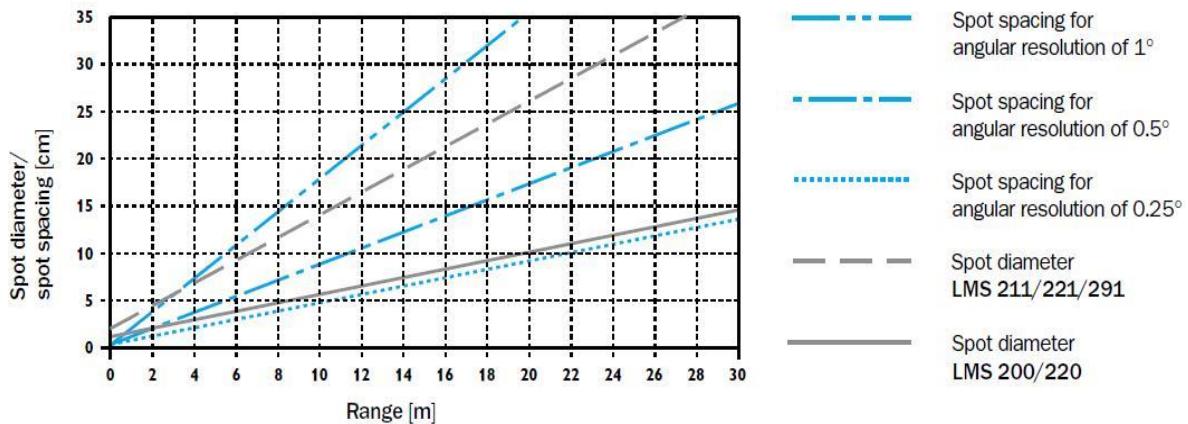


Figura 3.12 – Espaçamento dos raios e diâmetro do *spot* em relação ao alcance para diversos equipamentos SICK, retirado do manual de Descrição Técnica LMS (SICK, 2003).

Tabela 3.2– Resumo das especificações técnicas dos sensores SICK da série LMS 2XX retiradas do manual (SICK, 2003).

Type	Indoor: LMS200, Outdoor: LMS211, LMS221, LMS291
Scanning angle (field of vision)	100°/180° (type-dependent, see Table 11-1, Page 27)
Motor speed	75 Hz
Angular resolution (response time)	0.25° <sup>1)</sup> (53.33 ms); 0.5° (26.66 ms); 1° (13.33 ms); selectable
Range	Max. 80 m (type-dependent, see Table 11-2, Page 27)
Measurement resolution	10 mm
Measurement accuracy	typical ±35 mm (LMS200-30106, LMS211/LMS221-30106: typical ±15 mm)
Systematic error <sup>2)</sup>	LMS200-30106/LMS211-30106/LMS221-30106: - mm-mode: typical ±15 mm at range 1 to 8 m - cm-mode: typical ±4 cm at range 1 to 20 m LMS211/LMS221-30206/LMS291/LMS221-30106/LMS2x1-Sxx: - mm-mode: typical ±35 mm at range 1 to 20 m - cm-mode: typical ±5 cm at range 1 to 20 m
Statistical error <sup>3)</sup>	LMS200-30106/LMS211-30106/LMS221-30106: mm-mode: typical 5 mm at range ≤ 8 m / reflectivity ≥ 10 % / light ≤ 5 klx LMS211/LMS221-30206/LMS291/LMS221-30106/LMS2x1-Sxx: mm-mode: typical 10 mm at range 1 to 20 m / reflectivity ≥ 10 % / light ≤ 5 klx
Laser diode (wavelength)	Infra-red ( $\lambda = 905$ nm)
MTBF of LMS2xx <sup>4)</sup>	Indoor devices: 70,000 h Outdoor devices: 50,000 h
Laser class of device	Class 1 (eye-safe), to EN/IEC 60825-1 and to 21CFR 1040.10
Optical indicators	3 x LED (LMS200/LMS291 only)
Data interface	RS 232 or RS 422 (selectable in the connector plug)
Data transfer rate	RS 232: 9.6 / 19.2 kbd RS 422: 9.6 / 19.2 / 38.4 / 500 kbd
Data format	1 start bit, 8 data bits, 1 stop bit, no parity (fixed)
Switching inputs	All LMS2xx except LMS2xx-S14 (LMS Fast): 1 x ("Restart" or "Field set switching"), $U_{in} = 12$ to 24 V, $I_{in} = 5$ mA
Switching outputs (standard device)	LMS200/LMS291/LMS221/LMS221: 3 x PNP (OUT A to OUT C), high, typical 24 V DC ("field OK"), short-circuit-proof, selectable restart delay after field infringement (0; 100 ms to 255 s) - OUT A, OUT B (each max. 250 mA): "field infringement" - OUT C (max. 100 mA): "field infringement/error indication (Weak) <sup>5)</sup> "

## 3.7 Implementação da Interface

Seguindo o intuito de fazer um *software* acessível a todos, permitindo principalmente que qualquer pesquisador, aluno, etc, consiga trabalhar facilmente os dados enviados pelo sensor LMS-291, optou-se por estudar o trabalho desenvolvido pelo laboratório *GRASP* da Universidade de Pensilvânia, muito bem sucedido, e utilizado por uma equipe participante dos Desafios DARPA, o *Spirit of Berlin*. Este *Toolbox Sick LIDAR Matlab/C++* foi desenvolvido somente para funcionar em plataforma LINUX, devido ao fato de ser um código aberto com licença *BSD Open-Source*, o que impossibilitou sua utilização em pacotes de MATLAB para Windows.

### 3.7.1 Toolbox Sick LIDAR Matlab/C++

O Toolbox Sick LIDAR Matlab/C++ é um projeto de código aberto que fornece um *driver* estável e prático em C++ para a linha dos *scanners* a laser tipo LMS e LD da empresa SICK. Este código é liberado mediante uma licença de código aberto. Além dos *drivers* de baixo nível, o pacote também possui características que facilitam sua interface com o MATLAB, o que permite ao usuário coletar dados em tempo-real e sua reflectibilidade diretamente no Matlab. Estas características são especialmente atrativas, visto que permitem um rápido desenvolvimento de algoritmos pela exploração do alto nível de funcionalidade oferecido pelos vetores do Matlab.

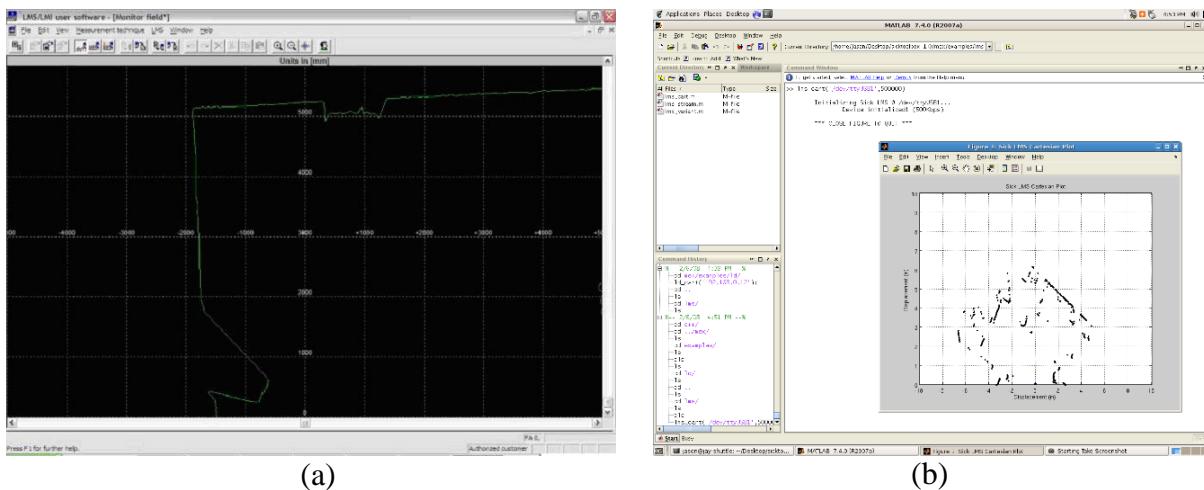


Figura 3.13 – Interfaces para LMS-SICK (2D): (a) imagem da tela do *software* LMI-SICK, S. O. Windows; (b) imagem 2D gerada pelo programa *Toolbox Sick LIDAR* (MATLAB), S.O. Linux.

Os *scanners* a laser da família LMS (SICK) possuem uma interface própria (Figura 3.13a) que facilita a sua utilização em tarefas industriais. A integração do *Toolbox Sick LIDAR* dentro do Programa MATLAB, permite fácil utilização destes sistemas (Figura 3.13b).

Na Figura 3.14 é apresentada a máscara do programa em MATLAB (GUI) desenvolvido para realizar a interface, em tempo real, com a plataforma posicionadora 3D e o *scanner* a laser LMS-291-05 da SICK. O programa em MATLAB que serve de base para poder receber e enviar comandos (dados) às placas de controle e ao sensor SICK LMS 291-05 do protótipo LMS-3D, desde um computador está no Anexo E.

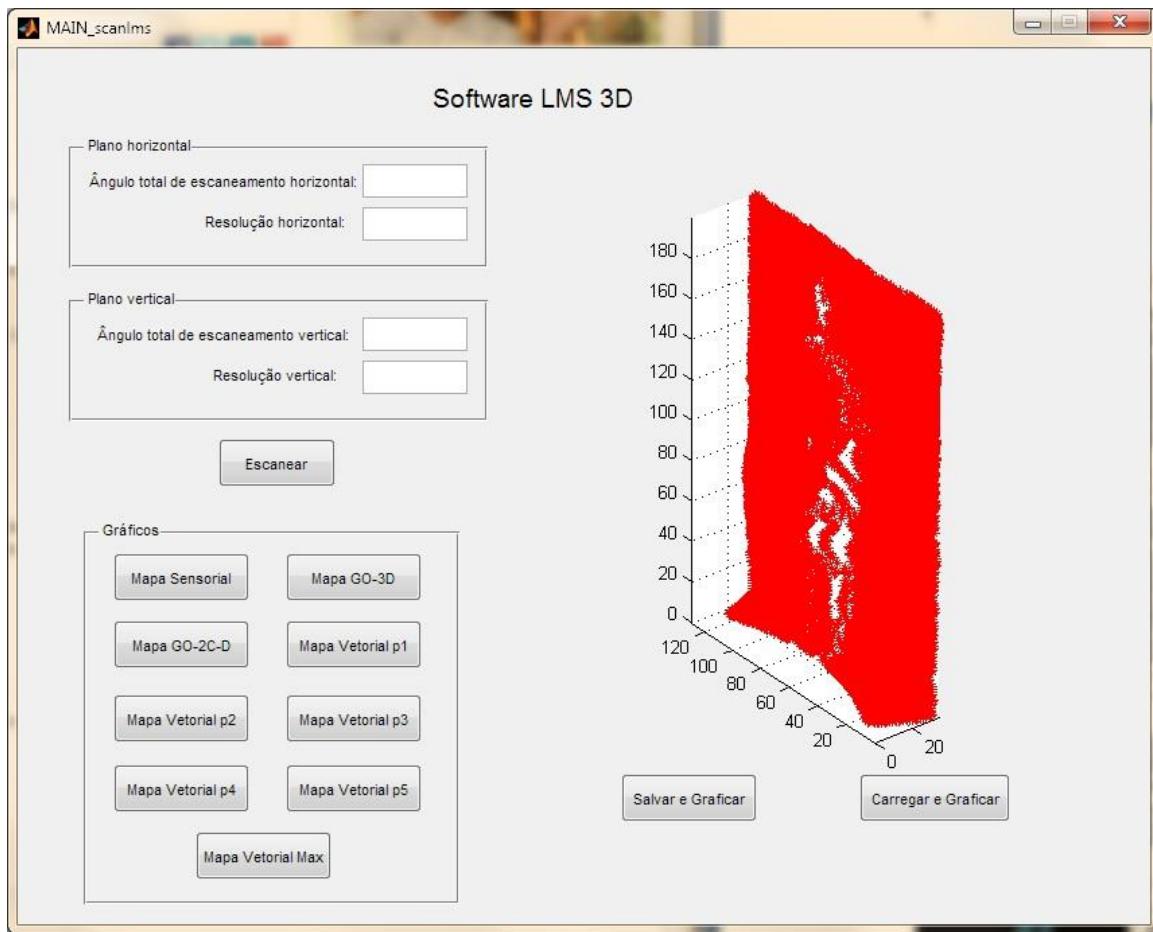


Figura 3.14 – Imagem da Interface LMS23 (*Laser Measurement Systems Software 3D*), desenvolvida para escaneamento 3D e fusão de sensores (LIDAR-3D + monovisão) utilizando recursos GUI do MATLAB.

### 3.8 Protótipo do *scanner* de medição a Laser 3D (LMS-3D)

O módulo LMS-3D é composto principalmente pela integração de um sensor medidor de distâncias a laser LMS 291-05 da empresa alemã SICK com uma Plataforma Posicionadora desenvolvida pelo grupo de pesquisa. Este módulo não só está conformado por componentes eletrônicos tais como: placas controladoras, motor de passo, *encoder*, estrutura mecânica (engrenagem, parafuso sem fim, etc), mas principalmente por programas ou sub-rotinas desenvolvidas para unir todas as partes.

Como primeiro passo para se alcançar os objetivos propostos no projeto, foi desenvolvido um protótipo do módulo *scanner* a laser 3D (Figura 3.15a). Para isso, foi utilizado um *scanner* tipo industrial e uma Plataforma Posicionadora (Figura 3.15b), a qual controla o giro do *scanner* em 360° no seu eixo principal, adquirindo informações de profundidade e intensidade.

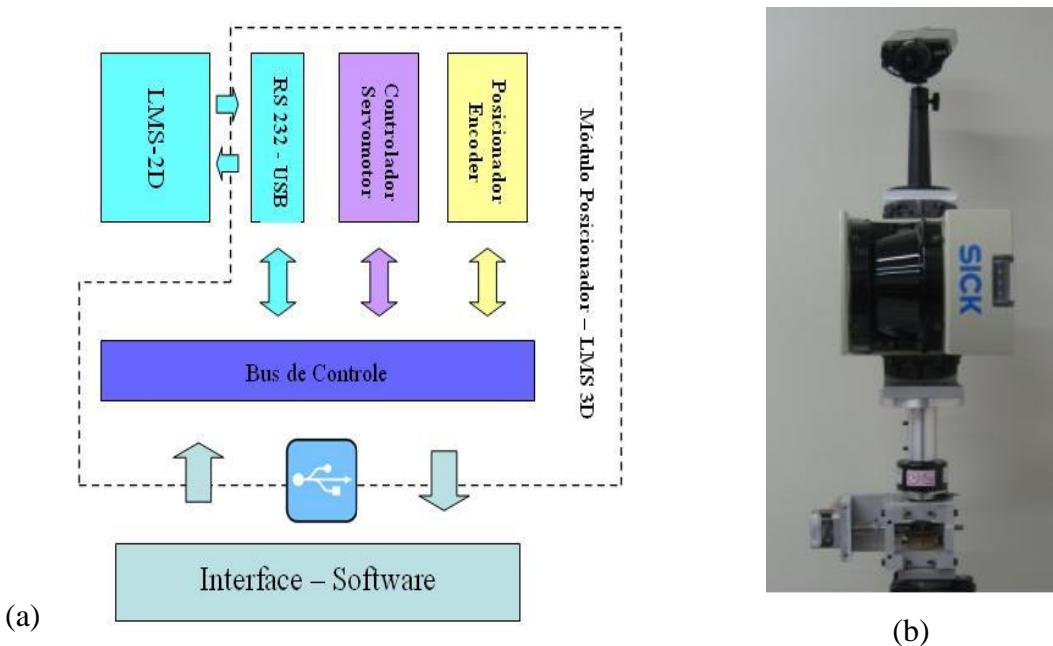


Figura 3.15 – Protótipo LMS-3D: (a) Diagrama de Blocos e (b) vista frontal do Módulo LMS-3D com uma câmera digital sobreposta.

O sistema é composto por um *scanner* de medição de distância a laser SICK LMS 291-05 (descrito anteriormente) montado sobre uma Plataforma Posicionadora.

A Plataforma Posicionadora, por sua vez, é formada por um motor de passo e um *encoder*, que junto com a parte mecânica (engrenagem e parafuso sem fim) podem proporcionar uma definição angular mínima de 7400 planos de varredura no plano vertical (para um motor de passo de 200 ppv). Tanto o controle do motor como a leitura do *encoder* são realizados por duas placas eletrônicas, baseadas no microprocessador PIC. A comunicação com as placas controladoras é feita via porta serial pelo protocolo RS-232. O LMS-291-05 utiliza uma interface serial RS-232, mas também pode utilizar uma interface RS-422, se colocado um conversor USB/RS-422. O programa de controle do Módulo LMS-3D foi desenvolvido em MATLAB, devido a sua flexibilidade para permitir o desenvolvimento de novas técnicas. Paralelamente, vem sendo desenvolvido um software em C# que substituiria o programa feito em Matlab. O programa de controle filtra e adquire os dados do módulo LMS-3D e os armazena em uma matriz prévia ao processo filtrado.

O presente capítulo detalhou o desenvolvimento de um sistema de percepção em três dimensões, baseado na tecnologia LIDAR. Primeiramente, foram listadas as últimas pesquisas relacionadas a estes sistemas, apresentadas as possíveis aplicações e tendências dos diversos sistemas de escaneamento 3D. Foi detalhada a metodologia utilizada na construção de um protótipo de sistema de percepção denominado LMS-3D: (i) princípio de funcionamento; (ii) tecnologia LIDAR; e (iii) implementação (seleção de materiais, construção da base, desenvolvimento da interface, etc).

## **4 MAPAS TELEMÉTRICOS**

O objetivo do mapeamento (*Map-Building*) é produzir e atualizar automaticamente mapas de ambientes *indoor/outdoor*, nos quais o sistema robótico móvel deverá se deslocar (de uma forma geral: interagir). Este mapa também servirá para o processo de auto-localização (no ambiente), sem que seja necessário modificá-lo para tal. A expressão “mapa” deve ser entendida como uma representação (às vezes abstrata), ou uma modelagem 2D ou 3D do ambiente. Esta representação é feita por meio do processamento das informações registradas pelos sensores, que monitoram continuamente o espaço ao redor do sistema robótico.

No presente capítulo, será abordada a questão da representação do ambiente por meio do sistema de percepção LMS-3D proposto e descrito nos capítulos anteriores. É enfatizada a representação e construção de mapas telemétricos que melhor se adaptem aos objetivos propostos para o sistema desenvolvido. Duas técnicas são bastante exploradas: mapas por grades de ocupação (GO), provinda da robótica probabilística (área de navegação primária - ANP); e mapas vetoriais, que simulam áreas contínuas de navegação (gradientes) a partir da tendência (direção preferencial) do movimento do robô (área de navegação contínua - ANC).

### **4.1 Introdução**

Robótica é a ciência da percepção e manipulação do mundo físico por meio de dispositivos mecânicos controlados computacionalmente. Alguns dos exemplos mais representativos dos sistemas robóticos são plataformas móveis para exploração planetária, carros que viajam autonomamente em rodovias, entre outros. Os sistemas robóticos têm em comum o fato de estarem imersos no mundo físico, percebendo este ambiente por meio de sensores, e interagindo (p.e. mover objetos, se transladar, etc) com o mesmo por meio dos seus atuadores.

Uma das mais importantes características destes sistemas robóticos móveis, é que, no geral, têm que operar em ambientes cada vez menos estruturados e inherentemente imprevisíveis. Estes

sistemas precisarão incrementar o cuidado com os dados dos sensores, e necessitarão de softwares mais robustos para poder lidar com as variadas situações. O principal desafio destes sistemas está em lidar com estes ambientes crescentemente dinâmicos e não estruturados.

Para lidar com estes ambientes, o sistema robótico precisará adotar uma estratégia de navegação baseada em duas abordagens principais para a representação de ambientes mapeados: (1) métrica; (2) topológica. Existe uma terceira, vinda das duas anteriores denominada (3) híbrida.

O mapeamento métrico representa geometricamente o ambiente no qual o robô está inserido, com uma determinada definição. O ambiente é representado com um determinado grau de detalhe: paredes, obstáculos, passagens, etc, mantendo uma boa relação com o mundo real, e são fáceis de construir. Os mapas métricos podem ser representados por: (1a) mapas de características ou por (1b) grades de ocupação (*grid*). Os mapas de características armazenam informações geométricas de formas encontradas no ambiente (p.e. retas, círculos, retângulos, etc), estas características são normalmente encontradas em ambientes internos e estruturados (humanos). A representação por grades de ocupação, discretiza os espaços contínuos do ambiente em uma matriz, na qual cada elemento é chamado de “célula”, isto é, de espaços igualmente espaçados que armazenam características específicas do ambiente, ao menos de três formas: (i) presença ou (ii) ausência de objetos, e (iii) ausência de medição.

O mapeamento topológico representa o ambiente como grafos, como mostrado na Figura 1.1, os nós correspondem a lugares significativos (lugares) e as arestas contêm informações de navegação entre os nós. Estes mapas permitem um planejamento eficiente, são compactos para armazenamento e não há necessidade da informação da posição exata do robô, apenas a indicação do nó onde se encontra.

Mapas híbridos misturam as características vantajosas de ambas as abordagens, de forma a se complementar e potencializar. Na Tabela 4.1 são listadas as vantagens e desvantagens das duas abordagens.

Tabela 4.1 – Vantagens e desvantagens das aproximações métricas e topológicas (SICILIANO, 2006).

	<b>Métrica</b>	<b>Topológica</b>
<b>Vantagens</b>	Fácil de construir, representar e armazenar.	Permite um planejamento do caminho mais eficiente.
<b>Desvantagens</b>	O reconhecimento de lugares é não ambígua / não sensível ao ponto de observação.	Não necessita da determinação precisa da posição do robô.
<b>Vantagens</b>	A programação de caminhos curtos é facilitada.	Facilidade na programação simbólica.
<b>Desvantagens</b>	Planejamento do caminho inefficiente.	Difícil de construir e manter, sobre tudo em ambientes amplos.
<b>Vantagens</b>	Necessita da determinação precisa da posição do robô.	O reconhecimento de lugares é ambíguo e sensível ao ponto de observação.
<b>Desvantagens</b>	Não é apropriado para programações simbólicas.	Pode levar a caminhos não otimizados.

Dentro deste contexto, os sistemas robóticos, vistos na perspectiva das ciências probabilísticas, possuem um elemento chave a ser levado em consideração, denominado de “incerteza”. Assim, pode-se definir incerteza como a informação crítica dada ao robô fora da sua tarefa (THRUN; BURGARD; FOX, 2005).

Robótica probabilística é uma área recente de pesquisa em robótica, que atribui incertezas à percepção e ação de um robô. A ideia principal da robótica probabilística é a de representar explicitamente as incertezas, utilizando cálculos da teoria da probabilidade. Especificamente, a probabilidade na robótica tenta representar os erros aleatórios próprios das condições do ambiente, assim como os sensores utilizados durante o processo de percepção. Este erro afetará o “conhecimento” que o robô tem sobre seu ambiente, assim como dos seus estados internos.

A utilização de modelos probabilísticos como alternativa para modelar as informações, permite que o “grau de incerteza” das medições e cálculos (inerentes às tarefas), sejam considerados ao longo dos processos. Modelos probabilísticos são distribuições de probabilidade

que representam a tendência de um comportamento estatístico e são definidos por parâmetros próprios. De forma geral, um estimador procura se aproximar do valor real do parâmetro, de forma eficiente.

Existem várias abordagens para enfrentar o problema de estimação de parâmetros, dependendo principalmente de o sistema poder ou não ser representado por um modelo linear em parâmetros ou não. Para o primeiro caso, o estimador de Mínimos Quadrados é uma técnica muito utilizada. A partir dele, várias abordagens têm se derivado, como por exemplo, o estimador de Máxima Verossimilhança, que representa um enfoque mais estatístico do problema de estimação. Este é o caso também dos estimadores Bayesianos, nos quais os parâmetros são tratados como variáveis aleatórias, que possuem uma distribuição conhecida *a priori*. Já para o caso não linear, tem-se o estimador de Mínimos Quadrados Totais, os M-Estimadores, assim como métodos iterativos por séries de Taylor (OCHOA-DIAZ, 2010).

## 4.2 Mapeamento

Um mapa não é senão uma representação de um conjunto de características do ambiente no qual o robô interage, no caso de um robô móvel. Ainda que as características de cada mapa dependam do tipo de mapa e da representação escolhida, este pode ser expresso como na Equação (4.1):

$$M = \{m_1, m_2, \dots, m_n | n = 1, \dots, N\} \quad \dots(4.1)$$

na qual  $N$  representa o número total de características (objetos ou estruturas) detectadas e cada  $m_n$  é a representação específica de cada característica do ambiente.

A capacidade de gerar um mapa pelo sistema robótico está fortemente relacionada à capacidade dele mesmo executar uma navegação autônoma através do ambiente. Esta é a razão pela qual os avanços nesta área têm sido orientados a proporcionar mapas cada dia mais precisos,

em termos de identificação e representação correta dos objetos e estruturas presentes no ambiente, assim como sua localização dentro da representação construída.

Thrun, Burgar e Fox (2005) destacam algumas considerações na hora de estruturar uma metodologia de construção de mapas, que se adapte aos diferentes tipos de ambientes a serem explorados pelo robô:

- Grau de detalhe: caso se precise de um maior detalhe, o gasto computacional (em recursos, tempo e espaço de armazenamento) para construir o mapa será maior, devido ao maior número de informações;
- Dimensões do ambiente: caso o ambiente seja maior, haverá maior dificuldade em poder adquirir as informações do mesmo, tendo como limitante o campo visual (alcance do sistema sensorial) do robô;
- Ruído nos sensores e atuadores: todas as leituras do sistema sensorial de qualquer sistema robótico estão “contaminadas” com o ruído do próprio dispositivo de medição e com o ruído do ambiente. Os atuadores também são afetados por este ruído, podendo afetar, p.e., a posição real do robô no ambiente;
- Ambiguidade sensorial: são as medições provenientes de várias fontes que produzem a mesma informação;
- Ciclos: caso o robô faça vários percursos, o problema será complexo na hora de estabelecer correspondências.

Como visto em capítulos anteriores, os mapas telemétricos oferecem um maior detalhe do mundo real, por esta simples razão são mais utilizados. Dentro desta categoria se destacam os mapas de Grades de Ocupação.

Como dito no capítulo anterior, a percepção é o processo pelo qual o robô utiliza seus sensores para obter informações a respeito do estado do seu ambiente. O resultado desta interação pode ser chamado de “medições”, “observação” ou “percepção”.

Os dados destas medições ( $z_t$ ) providenciam informações a respeito do estado momentâneo do ambiente. No caso dos sensores LIDAR, mesmo que todas as medições não sejam realizadas ao mesmo tempo e que exista um *delay* entre a primeira e a última medição, por convenção é assumido que a medição completa foi realizada em um único instante de tempo “ $t$ ” (THRUN; BURGAR; FOX, 2005).

### **4.3 Mapeamento com representação espacial baseado em Grades de Ocupação**

Esta técnica foi primeiro apresentada por Elfes (OCHOA-DIAZ, 2010). Posteriormente, o trabalho de Moravec lhe proporcionou a base probabilística com que é conhecida atualmente. Os mapas baseados em grades de ocupação, também conhecidos como mapas probabilísticos, representam uma técnica de decomposição fixa na qual o ambiente é representado por meio de um conjunto discreto de grades (células), no qual cada célula armazena o estado de ocupação da região do espaço correspondente. O estado de ocupação está representado pela probabilidade de que a célula em referência esteja ou não ocupada, isto pode ser entendido como a distribuição da probabilidade:

$$p(m | z_{1:t}, x_{1:t}) \quad \dots(4.2)$$

onde:

$m$  : é o mapa;

$z_{1:t}$  : são as medições desde o instante 1 até o instante  $t$ ;

$x_{1:t}$  : são todas as posições do robô durante a exploração do ambiente.

Esta expressão (Equação 4.2) pode ser vista como a probabilidade de ocupação, dado um conjunto de medidas ( $z$ ) e posições ( $x$ ). Esta definição coloca este problema dentro do contexto Bayesiano, sendo, desta forma, possível calcular, através da sua formulação, o valor de ocupação para cada grade.

Este método é muito utilizado quando o robô está equipado com sensores de alcance ativo (como o caso de radares a laser), devido a que os valores de alcance destes sensores, combinados com a informação da posição absoluta do robô, podem ser utilizados diretamente na atualização da probabilidade de ocupação de cada célula. Para isto, cada célula possui uma característica intrínseca, a qual armazena o “grau de ocupação da mesma”. O zero significa que não foi atingido por nenhum sinal. Na medida em que o número de detecção aumenta, a probabilidade de ocupação aumenta, e depois de superar certo valor, a célula é considerada como parte de um obstáculo. Outra vantagem deste sistema é a capacidade de filtrar leituras esporádicas provenientes dos obstáculos dinâmicos, isto lhe confere robustez considerável, se comparado com outras representações.

O desempenho deste tipo de representação depende, na maioria das vezes, do tamanho da grade. Uma célula muito pequena utilizada para representar um ambiente relativamente grande, ocasiona um gasto de memória importante. O contrário, células com um tamanho relativamente grande, tem a desvantagem de tender a distorcer a imagem (realidade), devido a que áreas de espaço livre podem ser vistas como ocupadas no mapa resultante. Precisa-se ter um bom compromisso, entre o tamanho da célula e o custo computacional associado ao mapeamento.

No início deste capítulo foram citados alguns trabalhos de pesquisa que desenvolveram aplicações para este tipo de representação. A seguir, serão apresentadas, a fim de exemplificar, pesquisas correlacionadas com a utilização das grades de ocupação dentro de um sistema de percepção.

Moras et al. (2012), apresentaram um método para caracterizar, em tempo real, um espaço “navegável” na frente de um veículo, visando tarefas de navegação autônoma ou de assistência ao condutor (SAC). O método utilizou um sistema LIDAR (especificamente um *scanner* de multicamadas). A caracterização do ambiente foi realizada através de grade de ocupação e sua abordagem a partir da camada de percepção (Figura 4.1).

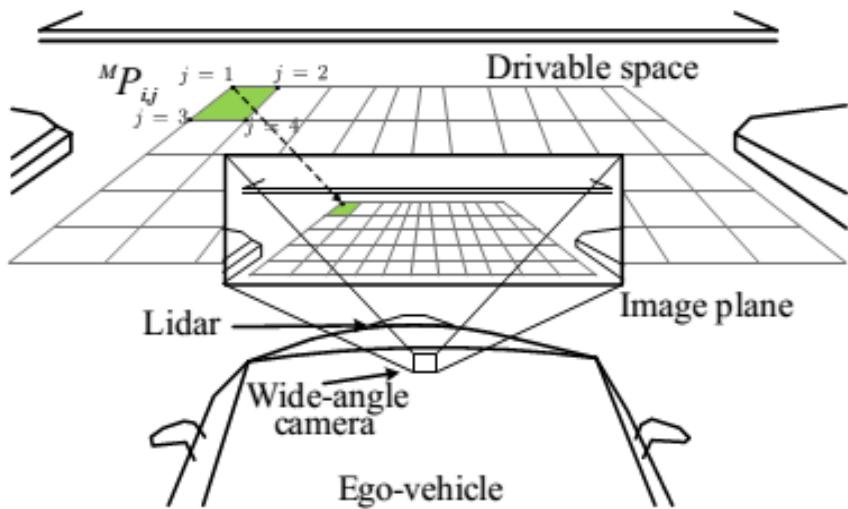


Figura 4.1 - Projeção de um espaço livre de navegação dentro do plano da imagem, detalhes da construção da Grade de Ocupação por fusão de sensores dentro de um sistema de percepção de um veículo, pesquisa relacionada a Moras et al. (2012).

Riaz et al. (2010) apresentaram uma solução completa para o problema SLAM de robôs móveis, para isto utilizaram: (i) métodos de extração de características e (ii) atualização contínua dos mapas de navegação. Para os experimentos utilizou-se o robô *Pioneer PeopleBot* equipado com sensores LMS, sonares e sistema de odometria. O mapa de localização está na forma de uma rede de marcações (*landmark*). Para a navegação foi utilizado o método das grades de ocupação. Alguns dos resultados são mostrados na Figura 4.2.

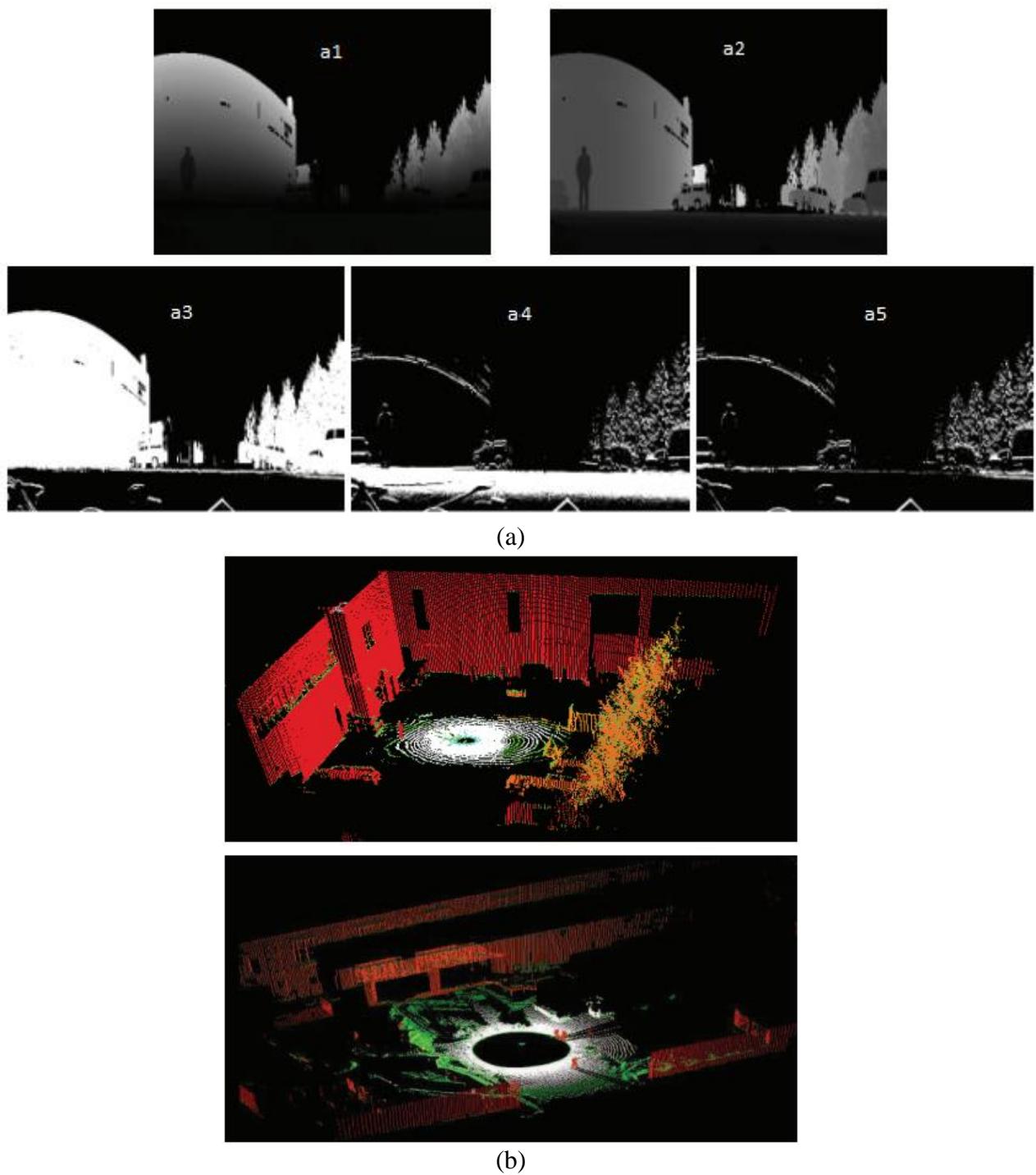


Figura 4.2 - (a) De cima para baixo, vistas parciais da (a1) altura e (a2) distância horizontal, para detecção de: (a3) objetos verticais, (a4) terreno e (a5) objetos espalhados; (b) Mapas de grades experimentais com classificação de objetos, determinados a partir da componente Z, normal à superfície. Resultados de Riaz et al. (2010).

Morris et al. (2011) apresentaram o projeto *CityFlyer*, cujo objetivo foi desenvolver um helicóptero quadro-motor (*micro-UAV*), capaz de voar autonomamente em ambientes 3D internos e externos. Este projeto apresentou uma nova estrutura para mapas 3D chamada de *Multi Volume Occupancy Grids* (MVOG), pode-se ver os detalhes na Figura 4.3.

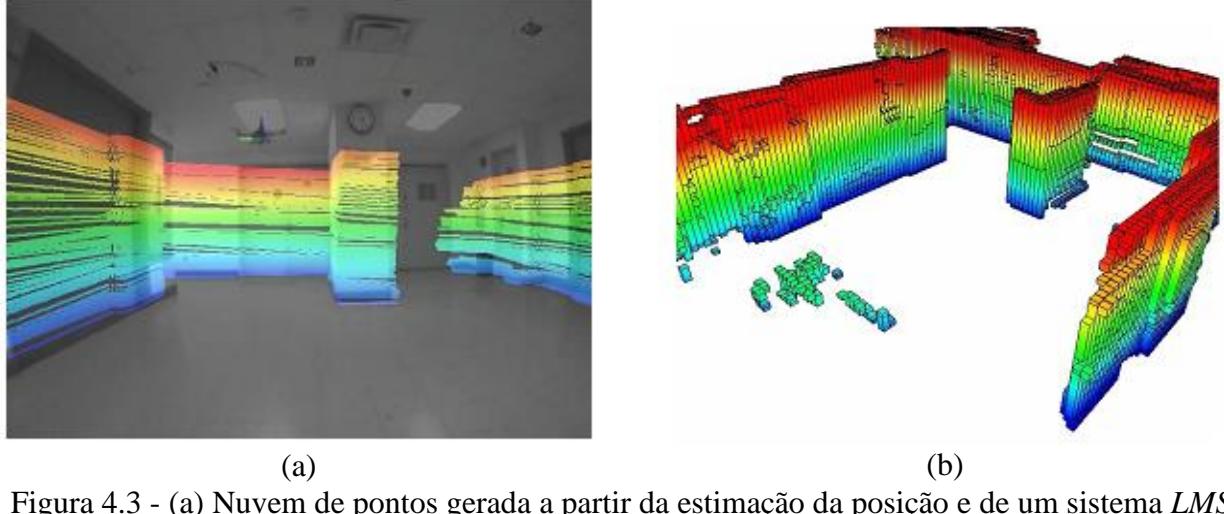


Figura 4.3 - (a) Nuvem de pontos gerada a partir da estimativa da posição e de um sistema *LMS Hokuyo* (*micro-UAV*); (b) Representação de dados MVOG, pesquisa relacionada com Morris et al. (2011).

A seção seguinte descreve matematicamente os passos no mapeamento por grade de ocupação na versão original.

#### **4.3.1 Algoritmo padrão do mapeamento baseado em Grades de Ocupação**

Os tipos de mapas considerados para grades de ocupação são aqueles que se definem sobre um espaço contínuo. A representação mais comum destes mapas é a 2D (mapa no plano da superfície), a partir da qual um mundo real em 3D é descrito. Como visto na revisão, existem grades de ocupação em 3D, mas são geradas com alto custo computacional.

Denotando-se  $m_i$  como as células da grade com um índice “ $i$ ”, um mapa de Grades de Ocupação partitiona o espaço em um número finito de células:

$$m = \sum_i m_i \quad \dots(4.3)$$

Cada célula está ligada a um valor de ocupação do tipo binário, este valor especifica (relaciona) quando uma célula está livre ou ocupada. Por convenção, pode-se escrever 1 para as ocupadas e 0 para as livres. A notação  $p(m_i = 1)$  é referida à probabilidade de uma determinada célula estar ocupada e pode ser entendido como um problema binário.

Na Tabela 4.2 é apresentado um algoritmo de mapeamento baseado em Grades de Ocupação.

Tabela 4.2 - Algoritmo de Grades de Ocupação, uma versão do filtro binário de Bayes (THRUN, 2000).

```
=====
1:      Algorithm occupancy_grid_mapping( $\{l_{t-1,i}\}, x_t, z_t$ ):
-----
2:          for all cells  $m_i$  do
3:              If  $m_i$  in perceptual field of  $z_t$  then
4:                   $l_{t,i} = l_{t-1,i} + \text{inverse\_sensor\_model}(m_i, x_t, z_t) - l_0$ 
5:              else
6:                   $l_{t,i} = l_{t-1,i}$ 
7:              endif
8:          endfor
9:          return  $\{l_{t,i}\}$ 
=====
```

A seguir serão apresentados os algoritmos e diagramas explicativos para a construção dos mapas elaborados no presente trabalho. É importante salientar que os algoritmos que representam

os mapas gerados a partir dos dados disponibilizados pelo sensor LMS-3D são abordados de forma determinística.

Ao todo, nove (09) mapas foram desenvolvidos. A primeira representação espacial é denominado de “Mapa Sensorial” e representa ponto a ponto (nuvem de pontos em vermelho) cada dado adquirido e armazenado pelo sensor, como se fosse uma nuvem de pontos vermelhos (cor selecionada para esta representação). Os outros oito (08) mapas foram baseados em duas abordagens: (i) grades de ocupação e (ii) mapas vetoriais.

## **4.4 Mapeamento com representação espacial baseado em Grades de Ocupação**

A representação espacial baseada em mapas de grades de ocupação (GO) foi realizada a partir de dois (02) mapas: (i) Mapa baseado em grades de ocupação em duas (02) dimensões, com a terceira dimensão representada de forma colorida (Mapa GO-2C-D) e (ii) Mapa baseado em grades de ocupação em três (03) dimensões (Mapa GO-3D).

### **4.4.1 Mapa baseado em grades de ocupação em duas dimensões com uma terceira dimensão representada de forma colorida (Mapa GO-2C-D)**

Quando se representa o ambiente com o objetivo de que um robô autônomo móvel (ou condutor) “entenda” de forma fácil as condições de ocupação, é interessante utilizar uma representação planar (2D), devido a que esta representação é simples de entender e “fácil” de se gerar computacionalmente. A idéia principal é a de representar espaços 3D “dentro” de um espaço 2D.

Os mapas baseados em grades de ocupação, foram utilizados comumente devido à sua simplicidade. Após contribuições probabilísticas, o embasamento dos mesmos foi maior e sua utilização amplamente divulgada. Esta tese contribui com esta abordagem sob o ponto de vista determinístico, caracterizando uma terceira dimensão (plano  $z$ ) com a utilização de cores, favorecendo desta forma a sua praticidade.

Na Figura 4.4 pode-se observar a estratégia adotada para gerar o mapa de ocupação GO-2C-D.

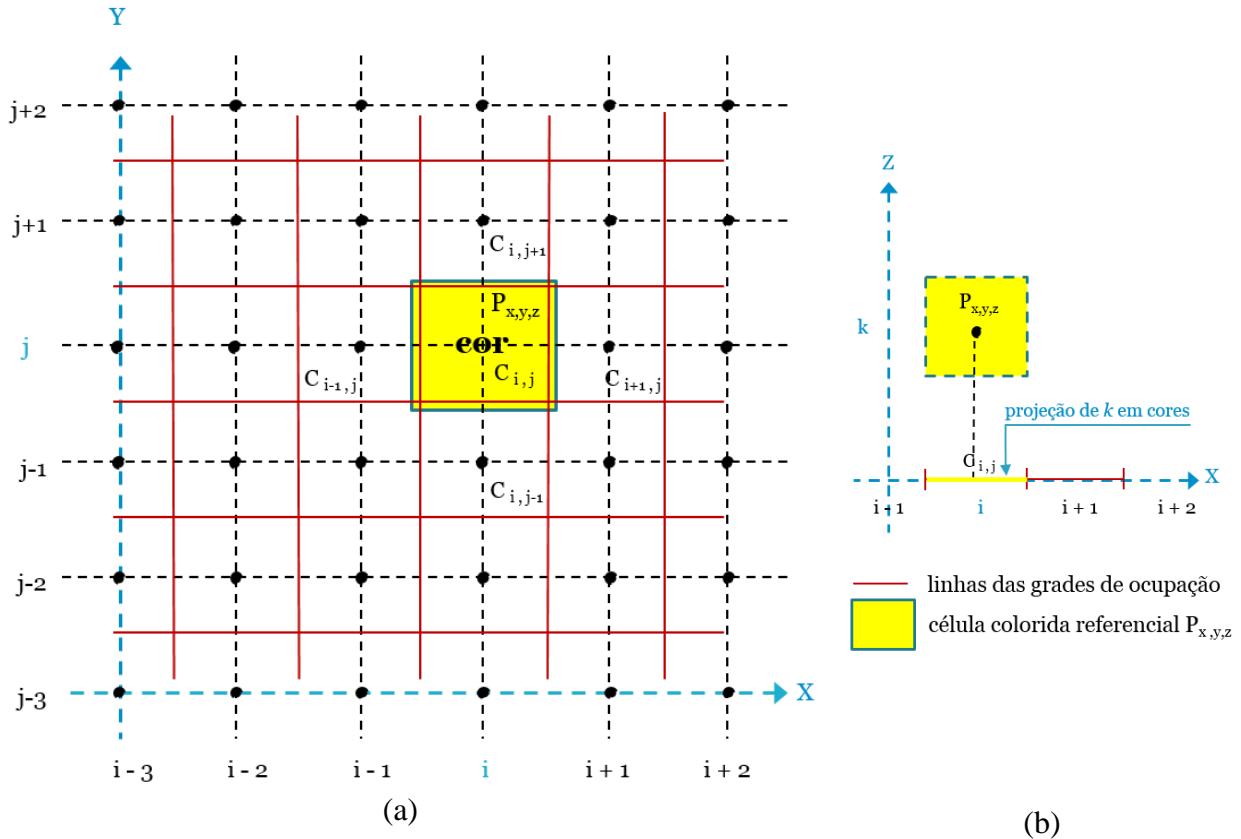


Figura 4.4 -Representação gráfica da estratégia adotada para geração de mapas GO 2C-D: (a) Célula referencial  $C_{i,j}$  dentro do mapa de ocupação em 2D (eixos X-Y); (b) Célula referencial nos eixos X-Z, altura da nuvem ( $k$ ) de pontos que está dentro da célula ( $P_{x,y,z}$ )

O algoritmo utilizado para geração deste mapa é apresentado a seguir:

---

**Algoritmo\_1** GO-2-C-D\_mapping ( $\{l_{t-1, (i,j)}\}, x_t, z_t$  )

---

```

1:   for all cells  $C_{i,j}$  do
2:     if  $C_{i,j}$  in perceptual field of  $z_t$  then
3:        $l_{t, (i,j)} = l_{t-1, (i,j)} + \text{inverse\_sensor\_model}(C_{i,j}, x_t, z_t) - l_0$ 
4:     else
5:        $l_{t, (i,j)} = l_{t-1, (i,j)}$ 
6:     end if
7:   end for
8:   return  $\{l_{t, (i,j)}\}$ 

```

---

O algoritmo tem como variáveis de entrada uma matriz com todos os valores de ocupação  $\{l_{t-1, (i, j)}\}$  atribuídos à grade de ocupação construída até o instante  $t-1$ , o vetor de localização do robô  $x_t = (x, y, \theta)'$  no instante  $t$  e os valores de leitura dos sensores  $z_t$  no instante  $t$ . Para cada célula  $C_{i,j}$  da grade construída é verificada se ela está dentro do campo de visão do robô. Nas linhas (05) e (06) para cada ponto do sensor  $z_t = (x, y, z)$ , no instante  $t$ , é verificado a que célula  $(C_{i,j})$  correspondente ( $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ ) pertence tal valor, e em seguida, é armazenado o máximo valor de  $(z)$ . A cor da célula correspondente será em função deste valor. Observando-se a Figura 4.4, a célula terá a seguinte função:

$$\begin{aligned} cor(C_{i,j}) &= f(k) \\ k &= \max(z) \\ \therefore \forall z \in P_{x,y,z} &\left\{ \begin{array}{l} i - 1/2 < x < i + 1/2 \\ j + 1/2 < y < j - 1/2 \end{array} \right. \end{aligned} \quad \dots(4.4)$$

Caso a célula correspondente não tenha nenhum valor  $(z)$  mensurado, a cor associada a este evento será “cinza” e significará que a célula não foi “percebida” (não existe nenhuma medição correspondente). Caso o valor de  $(z)$  esteja dentro de um valor limite denominado de “piso”, a cor associada será “branco”, isto significa que a célula foi “percebida” e não existe nenhum obstáculo, ou que o obstáculo é desprezível, entendendo-se esta medição como rugosidade ou desalinhamento do piso com o sensor.

A área determinada pelas células contínuas em cor “branca” determina uma área de navegação primária (ANP), já passível de ser navegada por um robô autônomo móvel, acionado por meio de rodas com diâmetro necessário para vencer a rugosidade do piso. É importante salientar uma limitação deste tipo de mapa: caso o objeto “percebido” não esteja apoiado no piso (p.e. objetos pendurados), poderá existir uma “falsa” (incompleta) representação de ocupação na célula correspondente. Neste caso, o algoritmo utilizado para a representação/geração do mapa GO 2C-D não é capaz de representar a diferença entre um objeto suspenso ou apoiado no piso. Além disso, será importante nesta situação, considerar a altura do robô para determinação do espaço livre de navegação.

#### 4.4.2 Mapa baseado em grades de ocupação em três dimensões (Mapa GO-3D)

Mesmo que os mapas 3D do tipo LIDAR tenham um gasto computacional muito alto, se apresentam como uma alternativa muito interessante, sobretudo quando se trata de robôs bípedes ou veículos não tripulados aéreos. Os ambientes onde os robôs estão interagindo são cada vez menos estruturados e este tipo de mapa fornece uma percepção robusta do que está se percebendo.

Na Figura 4.5 pode-se observar a estratégia adotada para gerar o mapa de ocupação GO 3D.

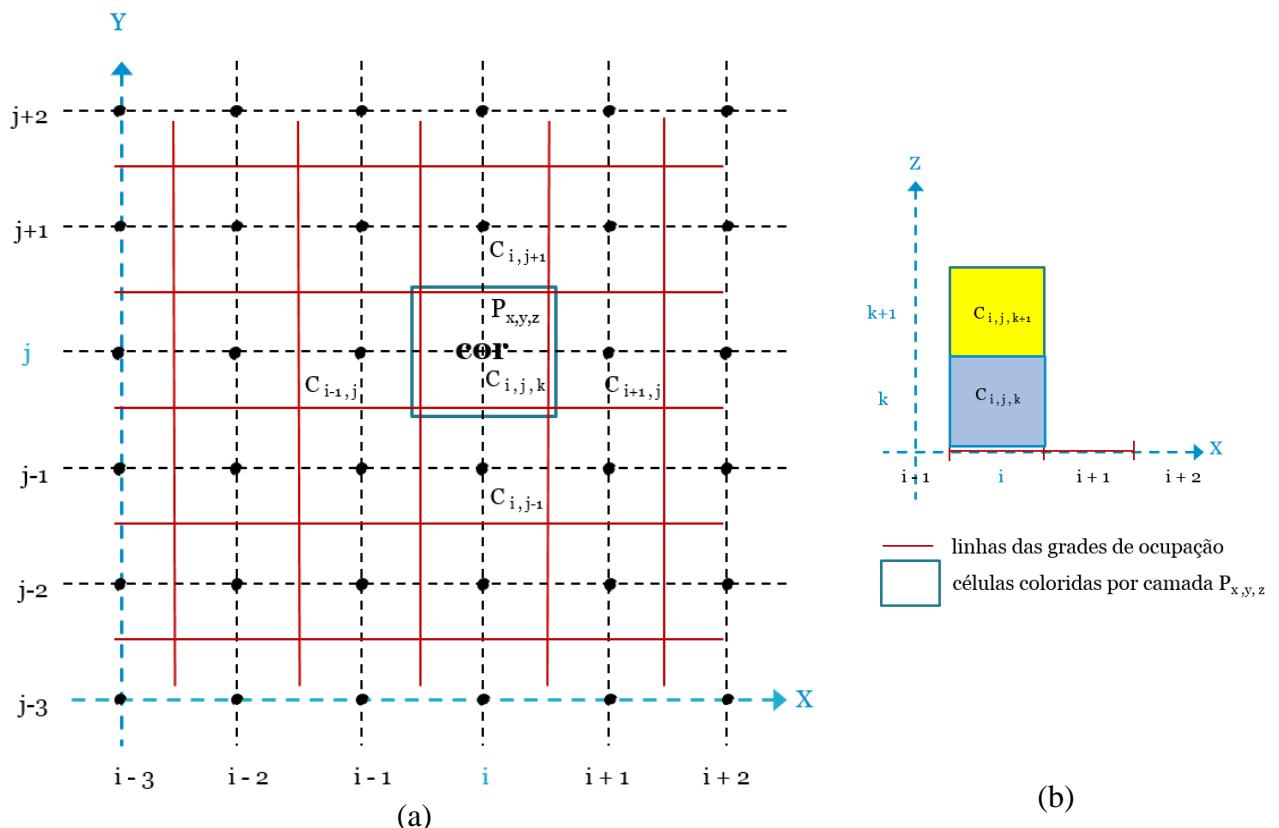


Figura 4.5 - Representação gráfica da estratégia adotada para geração de mapas GO 3D: (a) Célula referencial  $C_{i,j,k}$  dentro do mapa de ocupação em 3D (eixos X-Y); (b) Célula referencial nos eixos X-Z, altura da nuvem ( $k$ ) de pontos dentro da camada correspondente ( $P_{x,y,z}$ )

O algoritmo utilizado constrói o mapa camada por camada, como se estivesse construindo uma casa com tijolos quadrados (20 cm x 20 cm x 20 cm). Pode-se observar o algoritmo a seguir:

---

**Algoritmo\_1** GO-3D\_mapping ( $\{l_{t-1, (i, j)}\}$ ,  $x_t$ ,  $z_t$ )

---

```

1: for all cells  $C_{i,j,k}$  do
2:   if  $C_{i,j,k}$  in perceptual field of  $z_t$  then
3:      $l_{t, (i, j, k)} = l_{t-1, (i, j, k)} + \text{inverse\_sensor\_model}(C_{i,j, k}, x_t, z_t) - l_0$ 
4:   else
5:      $l_{t, (i, j, k)} = l_{t-1, (i, j, k)}$ 
6:   end if
7: end for
8: return  $\{l_{t, (i, j, k)}\}$ 
```

---

O algoritmo tem como variáveis de entrada uma matriz com todos os valores de ocupação  $\{l_{t-1, (i, j, k)}\}$  atribuídos à grade de ocupação construída até o instante  $t-1$ , o vetor de localização do robô  $x_t = (x, y, \theta)$ ’ no instante  $t$  e os valores de leitura dos sensores  $z_t$  no instante  $t$ . Para cada célula  $C_{i,j,k}$  da camada construída é verificada se ela está dentro do campo de visão do robô. Nas linhas (05) e (06) para cada ponto do sensor  $z_t = (x, y, z)$ , no instante  $t$ , é verificado a que célula ( $C_{i,j,k}$ ) correspondente pertence, e associada uma cor para o correspondente valor de  $(z)$ .

As camadas são construídas uma a uma. Cada célula (ocupada) é caracterizada por uma cor, que corresponde à altura da camada (do azul ao vermelho). Quando a célula não está ocupada, o espaço simplesmente não é preenchido.

Construídos os mapas de duas dimensões capazes de representar uma área de navegação primária (ANP), foi necessário aprofundar o estudo para o desenvolvimento de algoritmos que permitissem representar áreas que tenham a condição (mesmo restrita) de serem contínuas. Desta forma, procurou-se aumentar o espaço de navegação, sempre respeitando as restrições específicas do movimento para o robô móvel (p.e. diâmetro da roda, inclinação da rampa, etc). Estes mapas são apresentados a seguir.

## 4.5 Mapeamento baseado em Mapas Vetoriais

No presente trabalho se denominam mapas vetoriais aqueles mapas, cujo algoritmo procura mapear áreas contínuas de navegação (áreas planas, rampas, gradientes) a partir da tendência (orientação) do movimento do robô, providenciando uma área de navegação contínua (ANC), normalmente igual ou maior que a área de navegação primária (ANP), representada por mapas de grades de ocupação.

Os mapas vetoriais estão inspirados na utilização de estratégias de navegação por campos de forças virtuais (BORENSTEIN & KOREN, 1989), onde se associa a cada célula (com obstáculo) uma força repulsiva em relação ao robô. Dado um determinado ambiente e uma tarefa específica de deslocamento do ponto inicial (PI) ao ponto final (PF), sempre se terá a seguinte pergunta: qual o melhor caminho para realizar a tarefa? (sem desprezar a presença de obstáculos estáticos e/ou dinâmicos). Uma das estratégias adotadas para começar a otimizar esta trajetória, identifica o problema como sendo um problema de atração, do PF para o PI. Pode-se dizer então que esta atração (ou repulsão), identificada no mapa como um campo de forças vetoriais (também denominado “tendência”) prevalece, de alguma forma, no movimento (direção) do robô.

Por outro lado, em robótica autônoma móvel, quando se trata de otimizar recursos para geração de mapas e trajetórias, deve-se considerar qualquer premissa que possa reduzir a utilização de recursos (p.e. memória, processamento, etc) e tempo. Sendo assim, tratando-se da navegação de um robô autônomo dentro de um ambiente, a simples referência da direção da sua trajetória pode permitir que sejam gerados “rapidamente” mapas que associem esta direção, no presente trabalho denominado de “tendência do movimento” (p.e. direção norte-sul), com um determinado mapa de possibilidades para o seguinte movimento.

No contexto dos ambientes *indoor* e *outdoor*, sempre haverá áreas contínuas de navegação separadas entre si (descontinuadas). Sendo assim, a questão a ser estudada é: como determinar se estas áreas (separadas) podem ser contínuas sem utilizar mais recursos computacionais e tempo com uma análise do mapeamento completo? Neste contexto, as próprias rampas podem ser

entendidas como áreas contínuas de navegação que estão simplesmente inclinadas no sistema de coordenadas global, mas que no transcurso do movimento do robô (trajetória) poderiam ser percebidas como alinhadas ao sistema de coordenadas local (do robô).

Por outro lado, sem se aprofundar na questão da necessidade da calibração dos sensores do robô móvel, a utilização de algoritmos que procurem por áreas de navegação contínua, permite que o sistema seja mais robusto, devido a que não será imprescindível o alinhamento do sensor (LMS-3D) com a base do robô, para se obter os mapas correspondentes.

Os mapas vetoriais são relacionados à tendência do movimento. Quando é analisada esta tendência a partir de uma célula específica, faz-se necessário definir, para a mesma, uma orientação local. Para gerar os mapas vetoriais propostos no presente trabalho, foi necessário definir cinco (05) tendências de movimento (direção dos gradientes), utilizando os pontos cardinais: leste (L), oeste (O), sul (S) e norte (N); e colaterais: nordeste (NE), sudeste (SE), noroeste (NO), sudoeste (SO).

#### **4.5.1 Mapas vetoriais baseados em gradientes: Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste**

Como são cinco as tendências de movimento (direção dos gradientes), serão cinco os mapas vetoriais relacionados. O primeiro mapa vetorial será o gradiente leste (*L*), o qual analisará o gradiente entre a célula de referência *P* na posição  $C_{i,j}$  e a célula relacionada *L* na posição  $C_{i+1,j}$ , entendendo que o movimento “começa” na célula relacionada *L* e continua na direção Leste-Oeste. O vetor *p1* é função do gradiente  $f(\theta)$ , como mostrado na Equação (4.5).

$$p1 = f(\theta) = \frac{c_k - c_{k-1}}{c_i - c_{i+1}} < p_{\max} = 20\% \quad \dots(4.5)$$

A Figura 4.6 esquematiza o mapa vetorial gerado por vetores do tipo *p1*, o qual é representado por grades de ocupação e é gerado pelo algoritmo correspondente. Para entender uma área entre duas células como sendo contínua, o algoritmo entende que o gradiente (eixo *z*,

altura entre os nós  $P$  e  $L$ ) terá que ser menor ou igual a 20% da distância planar (eixo  $x$ ), entre os dois nós. A área é armazenada (e representada com a cor magenta) dentro de um mapa 2D, na própria célula de referência (Figura 4.6b).

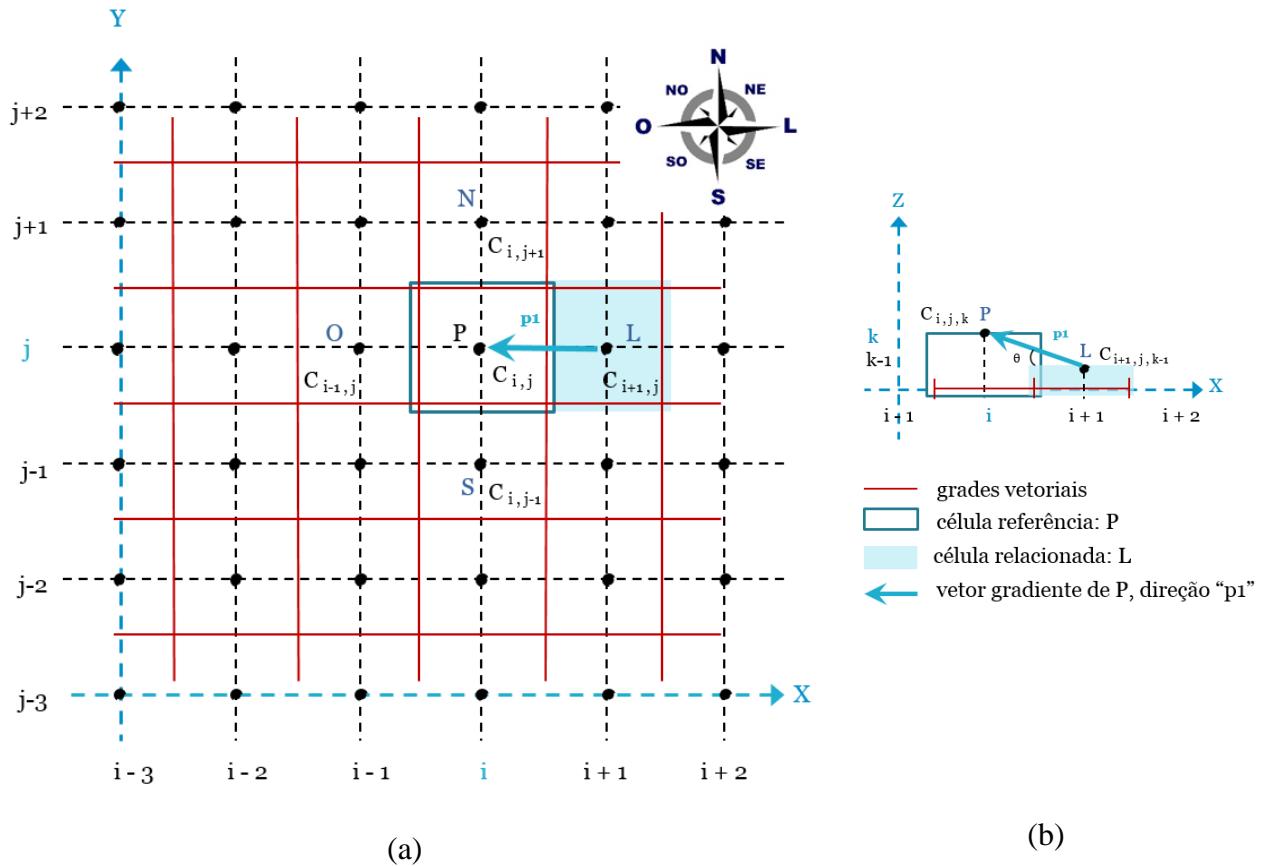


Figura 4.6 - Representação gráfica da estratégia adotada para geração do mapa vetorial  $p1$  (gradiente leste - L): (a) célula referencial ( $C_{i,j}$ ) relacionada com a célula leste ( $C_{i+1,j}$ ) dentro do mapa de grades de ocupação 2D (eixos X-Y); (b) células referencial e relacionada nos eixos X-Z

O segundo mapa vetorial (Figura 4.7) é o gradiente sudeste ( $SE$ ), o qual analisa o gradiente entre a célula de referência  $P$  na posição  $C_{i,j}$  e a célula relacionada  $SE$  na posição  $C_{i+1,j-1}$ , entendendo que o movimento “começa” na célula relacionada  $SE$  e continua na direção Sudeste-Noroeste. O vetor  $p2$  é função do gradiente  $f(\theta)$ , como mostrado na Equação (4.6).

$$p2 = f(\theta) = \frac{c_k - c_{k-1}}{\sqrt{(c_i - c_{i+1})^2 + (c_j - c_{j-1})^2}} < p_{\max} = 20\% \quad \dots(4.6)$$

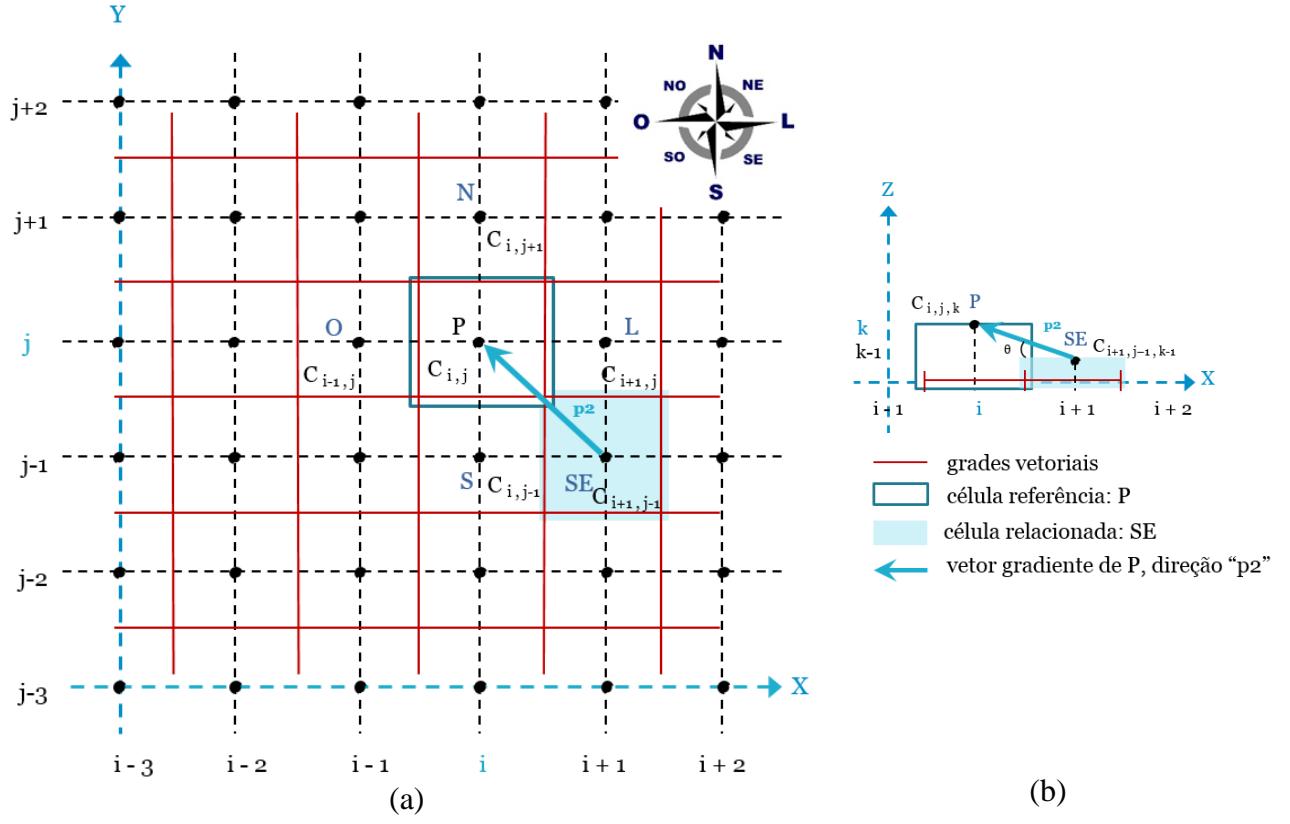


Figura 4.7 - Representação gráfica da estratégia adotada para geração do mapa vetorial  $p2$  (gradiente sudeste - SE): (a) célula referencial ( $C_{i,j}$ ) relacionada com a célula sudeste ( $C_{i+1,j-1}$ ) dentro do mapa de grades de ocupação 2D (eixos X-Y); (b) células referencial e relacionada nos eixos X-Z.

O terceiro mapa vetorial (Figura 4.8) é o gradiente sul ( $S$ ), o qual analisa o gradiente entre a célula de referência  $P$  na posição  $C_{i,j}$  e a célula relacionada  $S$  na posição  $C_{i,j-1}$ , entendendo que o movimento “começa” na célula relacionada  $S$  e continua na direção Sul-Norte. O vetor  $p3$  é função do gradiente  $f(\theta)$ , como mostrado na Equação (4.7).

$$p3 = f(\theta) = \frac{c_k - c_{k-1}}{c_j - c_{j-1}} < p_{\max} = 20\% \quad \dots(4.7)$$

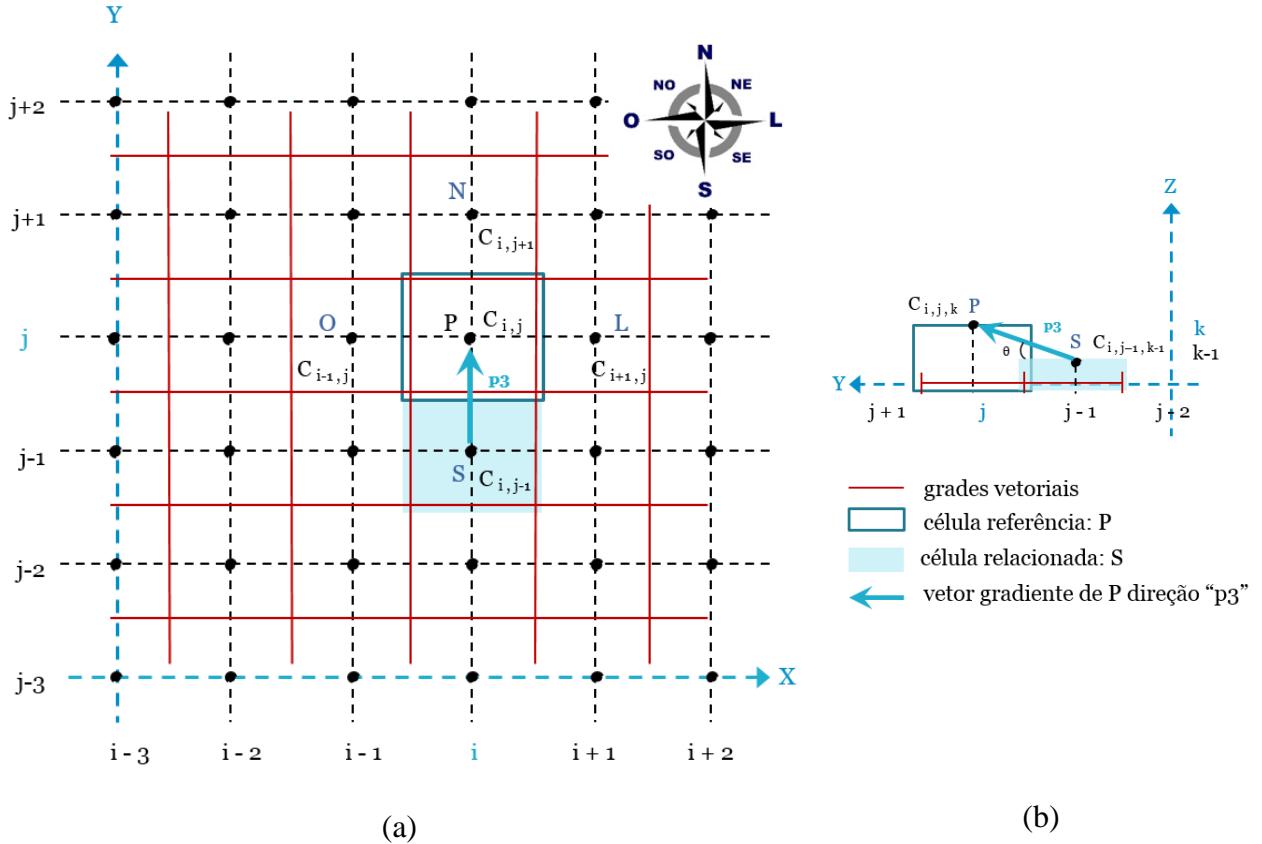


Figura 4.8 - Representação gráfica da estratégia adotada para geração do mapa vetorial  $p3$  (gradiente sul - S): (a) Célula referencial ( $C_{i,j}$ ) relacionada com a célula sul ( $C_{i,j-1}$ ) dentro do mapa de grades de ocupação 2D (eixos X-Y); (b) célula referencial e relacionada nos eixos Y-Z.

Os mapas vetoriais  $p4$  e  $p5$ , estão relacionados com os mapas  $p2$  e  $p1$  respectivamente, como mostrado nas Equações (4.8) e (4.9). A Figura 4.9, representa esquematicamente todos os mapas vetoriais gerados para a célula referencial  $P$ . Os vetores evidenciam a lógica adotada para o algoritmo, analisando sempre da célula contínua para a célula referencial  $P$ . Outros 3 mapas poderiam também ser gerados: gradiente noroeste – NO, gradiente sul – S e gradiente nordeste – NE.

$$p4 = f(\theta) = \frac{c_k - c_{k-1}}{\sqrt{(c_i - c_{i-1})^2 + (c_j - c_{j-1})^2}} < p_{\max} = 20\% \quad \dots(4.8)$$

$$p5 = f(\theta) = \frac{c_k - c_{k-1}}{c_i - c_{i-1}} < p_{\max} = 20\% \quad \dots(4.9)$$

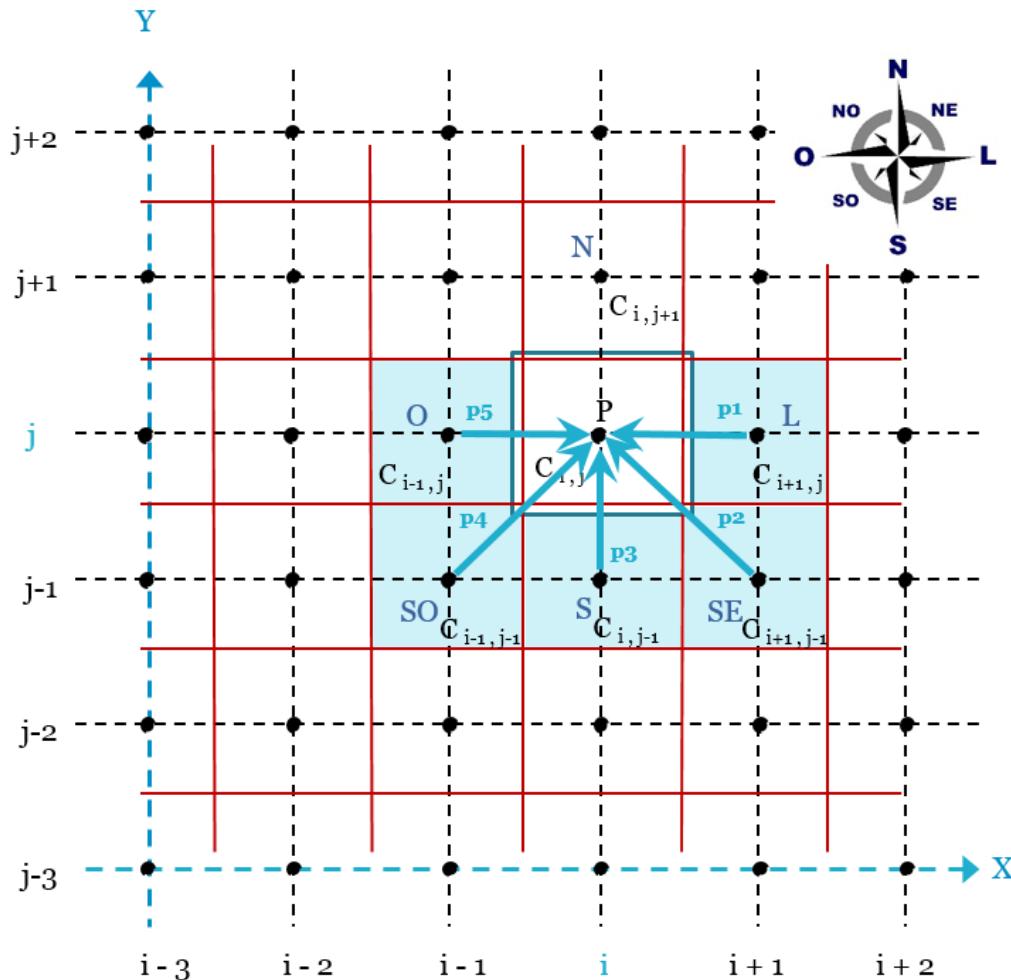


Figura 4.9 - Representação gráfica dos mapas vetoriais  $p1, p2, p3, p4$  e  $p5$  gerados para a célula referencial  $C_{i,j}$ , dentro de um mapa de grades de ocupação 2D.

O presente capítulo abordou técnicas para geração de mapas em duas dimensões (2D), com uma terceira intrínseca e em três dimensões (3D), visando a utilização de um sistema de percepção baseado na tecnologia LIDAR. Primeiramente, foram listadas as últimas pesquisas

relacionadas a estes sistemas e apresentadas as representações gráficas aplicadas a ambientes. Foram detalhadas as metodologias (lógica e algoritmo) aplicadas a dois tipos específicos de mapas: (i) mapas baseados em grades de ocupação (GO), contribuindo com um mapa colorido em 2D, a terceira dimensão está relacionada à cor, resultando um mapa híbrido 2C-D e um mapa 3D gerado por camadas; (ii) mapas vetoriais baseados em gradientes e tendências de movimento, contribuição desta tese. A representação gráfica do ambiente é realizada utilizando grades de ocupação. Os mapas geram dois tipos de áreas navegáveis: (i) área de navegação primária (ANP) e (ii) área de navegação contínua (ANC). A primeira área foi gerada a partir dos mapas GO e a segunda a partir da análise dos gradientes entre células a partir de (05) tendências de movimento, segundo a orientação local das células referência e relacionada (L, SE, S, SO, O).

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo, primeiro será brevemente retomada a questão da problemática abordada por esta tese; em segundo lugar, será apresentado o sistema de sensoriamento LIDAR-3D desenvolvido; em terceiro lugar, serão apresentados e discutidos os resultados dos mapas gerados a partir de três (03) casos de estudos propostos.

O Sistema de percepção LMS-3D, como um todo, foi desenvolvido no Laboratório de Mobilidade Autônoma (LMA) do Departamento de Mecânica Computacional (DMC) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

### **5.1 Preâmbulo: Problemática**

Para propor uma solução ao problema da navegação de robôs autônomos móveis, é necessário primeiro definir o problema específico a ser estudado; em segundo lugar, delinear o escopo do estudo; e em terceiro lugar, propor uma abordagem ou metodologia para uma solução particular (particular porque parte da visão do autor).

A seguir é revista a problemática anunciada no capítulo 1, para o presente trabalho:

- i) Sensoriamento do ambiente 3D a partir de um sistema LIDAR;
- ii) Detecção de obstáculos no espaço (3D) do sensor;
- iii) Detecção de superfícies contínuas e descontínuas: a fim de contemplar o problema de oclusão e calcular a disparidade, principalmente em casos como: paredes paralelas descontínuas, escadas, rampas, etc;
- iv) Modelamento do ambiente em mapas (determinísticos) locais;
- v) Construção de mapas de reconhecimento de áreas (superfícies contínuas e com gradientes) de navegação.

É necessário salientar que a problemática e os objetivos do presente trabalho estão relacionados com as camadas de SENSORIAMENTO, (INTERFACE SENSOR-PERCEPÇÃO), PERCEPÇÃO e MAPEAMENTO, dentro do desenvolvimento de Sistemas Robóticos. A abordagem para a solução do problema em particular, foi a da aplicação dos sistemas LIDAR.

Desde o início do presente trabalho, o primeiro desafio foi caracterizar um ambiente em 3D utilizando sistemas LIDAR. A razão foi de natureza simples: os ambientes 3D são os que mais se parecem com ambientes reais, assim pode-se definir uma primeira “percepção” do mundo 3D, ainda que abstrata, como sendo um mapa sensorial que armazena e representa os dados brutos vindos a partir dos sensores.

Dentro deste primeiro desafio, houve a iniciativa de utilizar um *scanner* a Laser 2D, dentro de uma configuração particular (com escolhas referenciadas), a fim de permitir o escaneamento 3D de um ambiente.

O segundo desafio foi consequência do primeiro, e também está inserido dentro da camada de percepção, a representação do ambiente 3D, previamente escaneado (mapa sensorial), de forma a evidenciar mais especificamente detalhes importantes. Essa representação deixa de ser puramente abstrata para tornar-se um modelo. Como existem vários modelos, optou-se por um modelo baseado em grades de ocupação.

Os mapas baseados em grades de ocupação 2D, propostos no presente trabalho, são adaptados dos denominados mapas de grades de ocupação 2.5-D, no qual cada célula contém intrinsecamente a informação da altura do objeto (definida previamente por uma posição e uma dimensão). A informação básica armazenada por cada célula dentro de um modelo baseado em grades de ocupação 2D define os seguintes estados: ocupado (1) em cor “preta”; livre (0) em cor “branca”, e desconhecido ou não observado (sem dados suficientes para definir seu próprio estado). O último estado é geralmente representado pela cor “cinza”.

Fazendo uma adaptação e procurando uma simbologia simples a partir da utilização de cores para representar o estado de uma célula, as grades de ocupação básicas do tipo 2D (terrena ou planar), no presente trabalho, são referenciadas como sendo mapas de grades de ocupação 2C-D (Mapas GO 2C-D). A letra “C” representa a informação do “grau” de ocupação (altura) da célula em cores. O programa assume uma gama de cores que vão desde o AZUL (referência mais baixa) até o VERMELHO (referência mais alta) no eixo Z do sistema de coordenadas local.

Para explorar ao máximo o escaneamento em 3D, e cumprir com os objetivos propostos, foi desenvolvida uma segunda representação espacial por camadas ou estágios de ocupação, neste caso as células de ocupação (contendo ou não uma nuvem de pontos) são tridimensionais.

Um terceiro tipo de mapa, denominado mapa de gradiente vetorial, foi desenvolvido e utilizado para gerar áreas de navegação contínua (ANC) analisando a “tendência” do movimento do robô em um determinado instante. Esta “tendência” é relacionada no mapa com a direção do gradiente vetorial.

Estudos de caso evidenciaram vários detalhes, a saber: oclusão, rampas e objetos elevados (pendurados).

## 5.2 Sistema de Percepção LMS-3D

A motivação deste trabalho nasceu a partir do estudo/observação das limitações dos sistemas de visão monoculares em tarefas de navegação de sistemas robóticos. Destas observações, nasce o protótipo LMS-3D. Este seria um passo importante nos objetivos propostos para Laboratório de Mobilidade Autônoma (LMA).

Em continuação, na Figura 5.1, o sistema de percepção LMS-3D é apresentado.

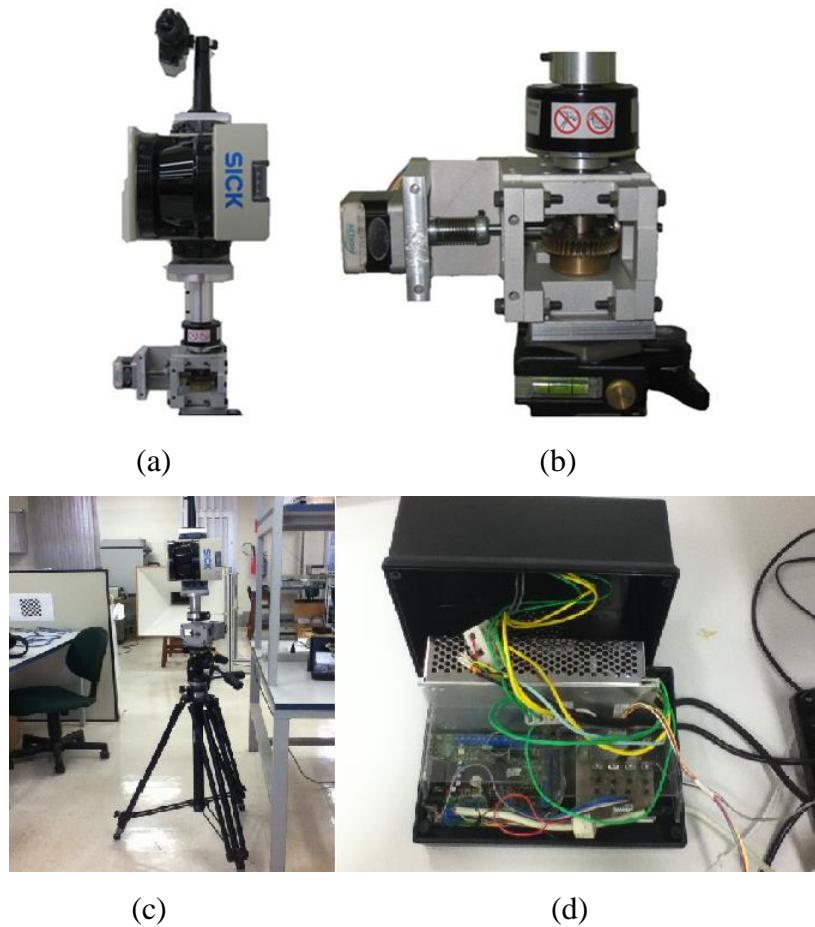


Figura 5.1 – Protótipo do sistema de percepção LMS-3D: (a) vista completa do sistema mostrando o Laser SICK LMS 291-05; (b) Plataforma posicionadora (motor de passo, *encoder*, engrenagens, estrutura metálica, etc); (c) Sistema LMS-3D em cima do seu tripé, pronto para o escaneamento; (d) vista interna da caixa de controle (placas controladoras e de alimentação).

### 5.2.1 Características do Protótipo Sistema LMS-3D

➤ **Dimensões físicas da Caixa de Controle:**

- Altura: 10 cm;
- Base: 15 cm por 18 cm;
- Peso: 0,3 kg;

➤ **Características físicas da Plataforma (com o LMS-291-05)**

- Altura: 55 cm;
- Base: 10 cm por 20 cm;
- Material da plataforma posicionadora: alumínio (base), bronze (engrenagem);
- Peso da Plataforma posicionadora: aproximadamente 1 kg;
- Peso LMS-291-05: 4,5 kg; (+ 0,5 kg suporte) = 5,0 kg;
- PESO TOTAL do Sistema completo: 1 kg + 5,0 kg = 6,0 kg.

➤ **Requisitos e características de alimentação e de transmissão de dados:**

- Alimentação 110 V (CA) para a Caixa de Controle;
- Conexão RS232, entrada serial 1 da Caixa de Controle;
- Conexão RS232, entrada serial 2 do LMS 291, com velocidades 9,6/19,2 kbd (o LMS 291 também possui a configuração RS422, que transmite a velocidades de até 500 kbd);
- Consumo de potência: 20 W (LMS-291) + 20 W (Controle) = 40 W;
- Temperatura de operação<sup>1</sup>: entre 0-50 °C.

**OBSERVAÇÕES:**

<sup>1</sup> Abaixo de 0°C de temperatura, se recomenda a compra de um Sistema de aquecimento próprio para o aparelho LMS-291-05/SICK (SICK, 2003).

➤ **Requisitos de softwares e programas:**

- Sistema operacional LINUX, programa comercial UBUNTU;
- Programa MATLAB – MathWorks, versão 7.1.0.183 (R14) Service Pack 3, August/02/2005;
- *Toolbox SICK LIDAR Matlab/C++* (Laboratório *GRASP* da Universidade de Pensilvânia);

➤ **Dados técnicos do Escaneamento:**

- Ângulo total horizontal de escaneamento [H]: entre 10° e 360°;
- Resolução angular horizontal do escaneamento<sup>2</sup>: entre 0,5° e 10°;

- Ângulo total vertical de escaneamento [V]: 100° ou 180°;
- Resolução angular vertical do escaneamento: 0,25°, 0,5° e 1°;
- Tempo de escaneamento (p.e. H-180°/1° x V-180/1°, 32761 pontos): 87,86 segundos;
- Máxima definição: H-360°/0,5° x V-100°/0,25°, totalizando  $721 \times 401 = 281121$  pontos;
- Alcance típico das medições<sup>3</sup>: 30 m (alcance máximo de 80 m);
- Resolução da medição: 10 mm;
- Precisão da medição:  $\pm 35$  mm;
- Erro Sistemático<sup>4</sup>:  $\pm 5$  cm para um alcance de 1 a 20 m (o sistema do LMS-3D está configurado em cm).
- Erro Estatístico<sup>5</sup>: 10 mm, para um alcance de 1 a 20 m, refletividade  $\geq 0\%$ , luz  $\leq 5$  klx.
- Diodo do Laser (comprimento de onda): Infravermelho ( $\lambda = 905$  nm).
- Classe de Laser: Classe 1 (olhos-seguros) com referência para EN/IEC 60825-1 e para 21CFR 1040.10.

#### **OBSERVAÇÕES:**

<sup>2</sup> Resolução horizontal poderia ser maior, a plataforma posicionadora é a que controla o movimento rotacional no plano horizontal. Este movimento rotacional é acionado por um motor de passo, um parafuso sem fim e uma engrenagem, a resolução poderia ser tão pequeno quanto se desejar. Resolução, é definida como a menor distância, diferente de zero, entre dois valores de medições consecutivas.

<sup>3</sup> Com refletividade de 10% (SICK, 2003).

<sup>4</sup> Erro Sistemático, dentro de condições ambientais adequadas, boa visibilidade  $T_a = 23^{\circ}\text{C}$ , refletividade de 10 para 10 000 %. Pode-se definir o erro sistemático como o somatório de todos os desvios sobre algumas medições (alcance e refletividade) que não pode ser reduzido utilizando valores médios.

<sup>5</sup> Erro Estatístico: Resultado de uma medição menos o valor médio verdadeiro (ou média limite).

### 5.3 Experimentos e resultados utilizando o Sistema de percepção LMS-3D

O passo seguinte a obtenção dos dados gerados pelo sistema foi a filtragem, devido à obtenção de pontos irregulares e inconsistências. Como explicado, devido às características do sensor, as medições dependem das boas condições de medição intrínsecas, em especial refletividade dos objetos no ambiente. Dependendo se é ambiente interno ou externo, de 2 a 5 % dos valores medidos não são válidos devidos a problemas de refletância. Sendo assim, uma forma para tratamento de valores inconsistentes ou *outliers*, é a utilização de filtros estatísticos, como apresentado na Figura 5.2.

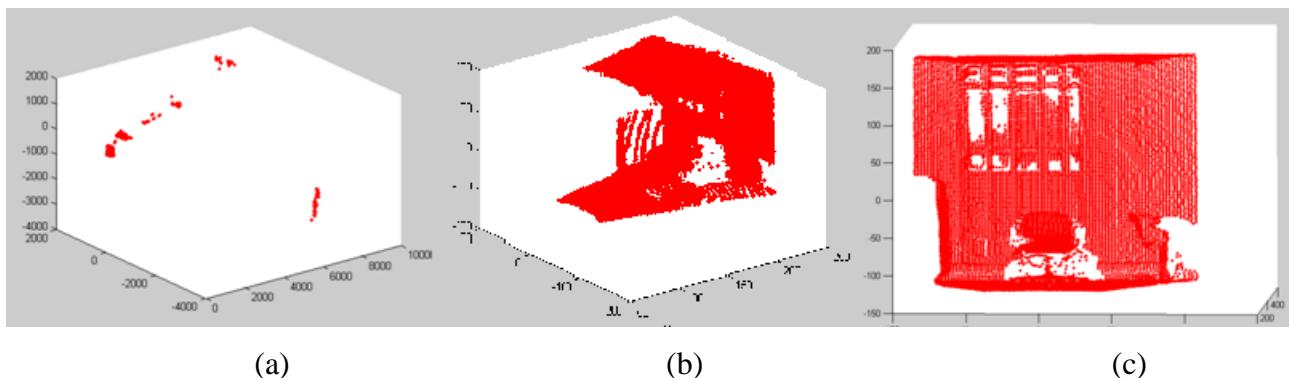


Figura 5.2 – Sistema de Percepção LMS-3D: (a) pontos capturados sem filtragem; (b) nuvem de pontos após filtragem; (c) vista frontal dos pontos amostrados.

No segundo passo, um filtro permitiu retirar os pontos não interessantes para a aplicação selecionada, por exemplo, eliminando pontos referentes ao teto do ambiente escaneado. É importante salientar que as leituras para este caso foram realizadas em ambientes internos. Para validar as primeiras medições e assim verificar as medições a partir de referências reais, uma pessoa (homem) de aproximadamente 1,68 m foi escaneada, a fim da geração de um mapa sensorial, como pode ser visto na Figura 5.3.

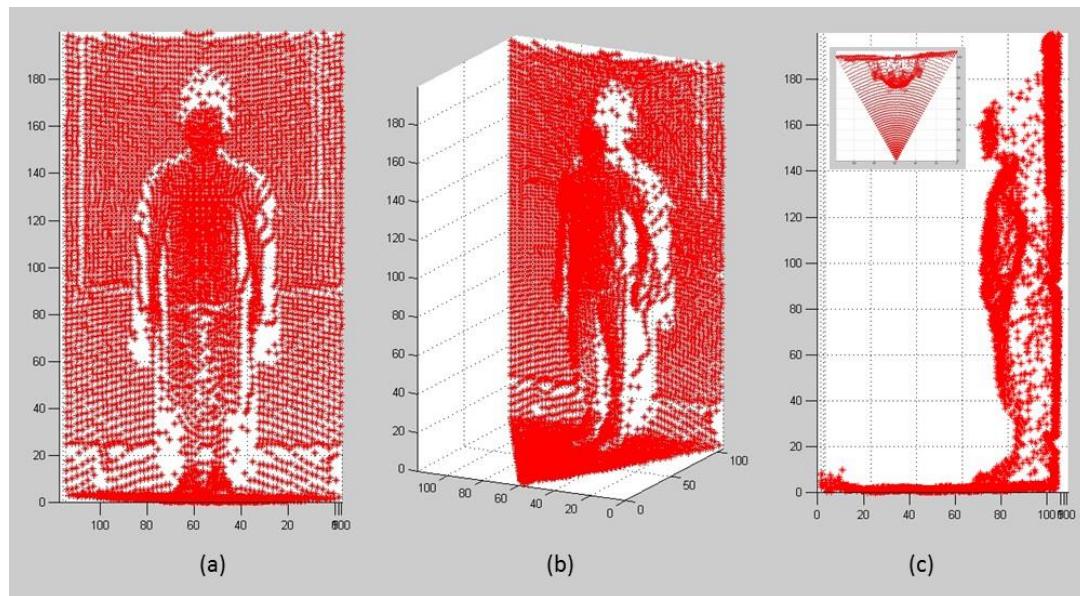


Figura 5.3 – Mapa sensorial de uma pessoa adulta (sexo masculino) com aproximadamente 1,68m de altura gerada a partir do Sistema de Percepção LMS-3D: (a) Vista frontal; (b) Vista em perspectiva; (c) vista lateral, com detalhe da vista superior.

Na Tabela 5.1 constam os dados técnicos deste escaneamento. Não foi contabilizado o tempo do processo; os dados de erros e resoluções foram extraídos do *datasheet* do equipamento.

Tabela 5.1 - Resumo das características do escaneamento de uma pessoa (Referência Figura 5.3).

Dados Técnicos / Características	Valor	Unidade
Ângulo total horizontal de escaneamento (H)	60	[°]
Resolução angular horizontal (RH)	1	[°]
Ângulo total vertical de escaneamento (V)	180	[°]
Resolução angular vertical (RV)	1	[°]
Número de pontos (N)	11.041	[pontos]
Tempo de escaneamento (T)	-	[s]
Resolução da medição	10	[mm]
Precisão da medição	±35	[mm]
Erro Sistemático	±5	[cm]
Erro Estatístico	10	[mm]

Em alta definição, verifica-se a seguir um segundo exemplo (Figura 5.4) de escaneamento da parte superior do corpo de uma pessoa. Esta é a máxima definição que, por *default*, o sistema LMS-3D pode obter. Na Tabela 5.2 são apresentadas as características e detalhes do modelo.

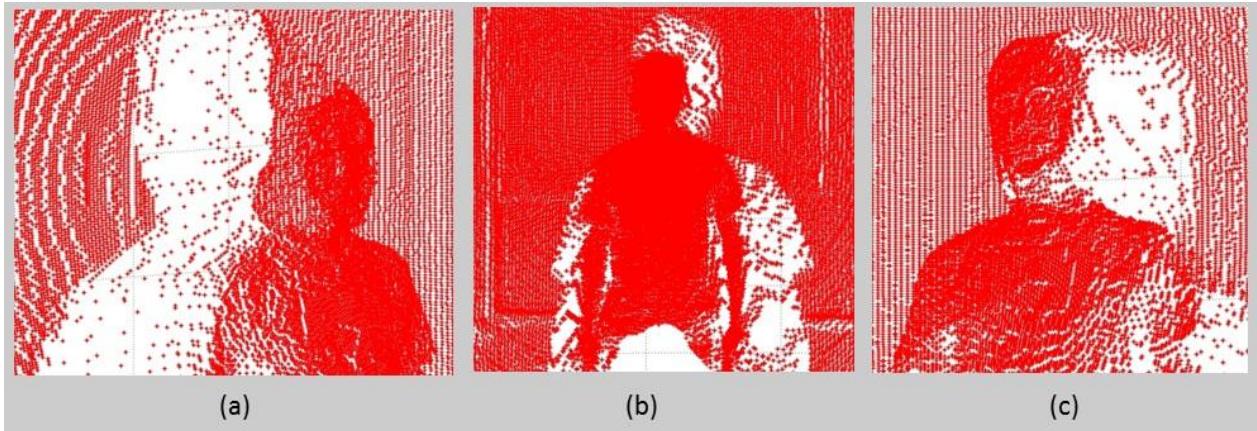


Figura 5.4 – Mapa sensorial da parte superior de uma pessoa adulta (sexo masculino) gerado a partir do Sistema de Percepção LMS-3D: (a) vista lateral direita; (b) vista frontal; e (c) vista lateral esquerda.

Tabela 5.2 - Resumo das características do escaneamento da parte superior uma pessoa adulta (Referência Figura 5.4).

<b>Dados Técnicos / Características</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Ângulo total horizontal de escaneamento (H)	90	[°]
Resolução angular horizontal (RH)	0,5	[°]
Ângulo total vertical de escaneamento (V)	100	[°]
Resolução angular vertical (RV)	0,25	[°]
Número de pontos (N)	72.581	[pontos]
Tempo de escaneamento (T)	-	[s]
Resolução da medição	10	[mm]
Precisão da medição	± 35	[mm]
Erro Sistemático	±5	[cm]
Erro Estatístico	10	[mm]

Dentro do ângulo de escaneamento, a Figura 5.4 apresenta sete vezes mais pontos que a Figura 5.3. A definição não foi maior, pois existe uma limitação de ângulo de escaneamento no sensor LMS-291, em especial para resoluções angulares de 0,25°. Mesmo assim, detalhes do rosto puderam ser evidenciados.

Para se verificar a capacidade do sistema de percepção proposto, foram realizadas leituras em ambiente controlado – *Indoor* (temperatura ambiente acessível de 23°C e sem problemas de iluminação).

- 1- Representação do ambiente em Mapas sensoriais,
- 2- Mapeamento e representação de ambientes 3-2D com mapas de grades de ocupação GO-2C-D e GO-3D
- 3- Mapeamento e representação de ambientes com problemas de oclusão, em específico paredes paralelas.
- 4- Mapeamento e representação de ambientes com problemas de rampas e escadas.
- 5- Mapeamento e representação de ambientes com problemas de obstáculos elevados a uma determinada altura do piso.

### **5.3.1 ESTUDO DE CASO I: Representação sensorial e mapeamento por grades de ocupação (GO-2C-D e GO-3D) e gradiente de vetores (Mapa Vetorial) de um ambiente *indoor* com obstáculos estáticos, abordando o problemas de oclusão (paredes paralelas)**

Um escaneamento em ambiente com paredes paralelas (evidentes) foi realizado para verificação de desempenho nos casos de oclusão. A Tabela 5.3 apresenta as principais características das medições realizadas para este exemplo.

Tabela 5.3 - Resumo das características do escaneamento do Estudo de Caso I (Referência às Figuras 5.5 a 5.12).

Dados Técnicos / Características	Valor	Unidade
Ângulo total horizontal de escaneamento (H)	180	[°]
Resolução angular horizontal (RH)	0,5	[°]
Ângulo total vertical de escaneamento (V)	180	[°]
Resolução angular vertical (RV)	0,5	[°]
Número de pontos (N)	130.321	[pontos]
Tempo de escaneamento (T)	-	[s]
Resolução da medição	10	[mm]
Precisão da medição	± 35	[mm]
Erro Sistemático	± 5	[cm]
Erro Estatístico	10	[mm]

Nas Figuras 5.5 a 5.12 são apresentados os mapas digitais resultados do escaneamento de um ambiente adequado para o estudo do problema proposto no CASO I (oclusão). São apresentados o mapa sensorial do ambiente, detalhes que evidenciam objetos, mapas que utilizam GO em 2D com elevação em cores, mapas de GO com 3D, e cinco casos de mapas com gradientes vetoriais, assim como as comparações correspondentes.

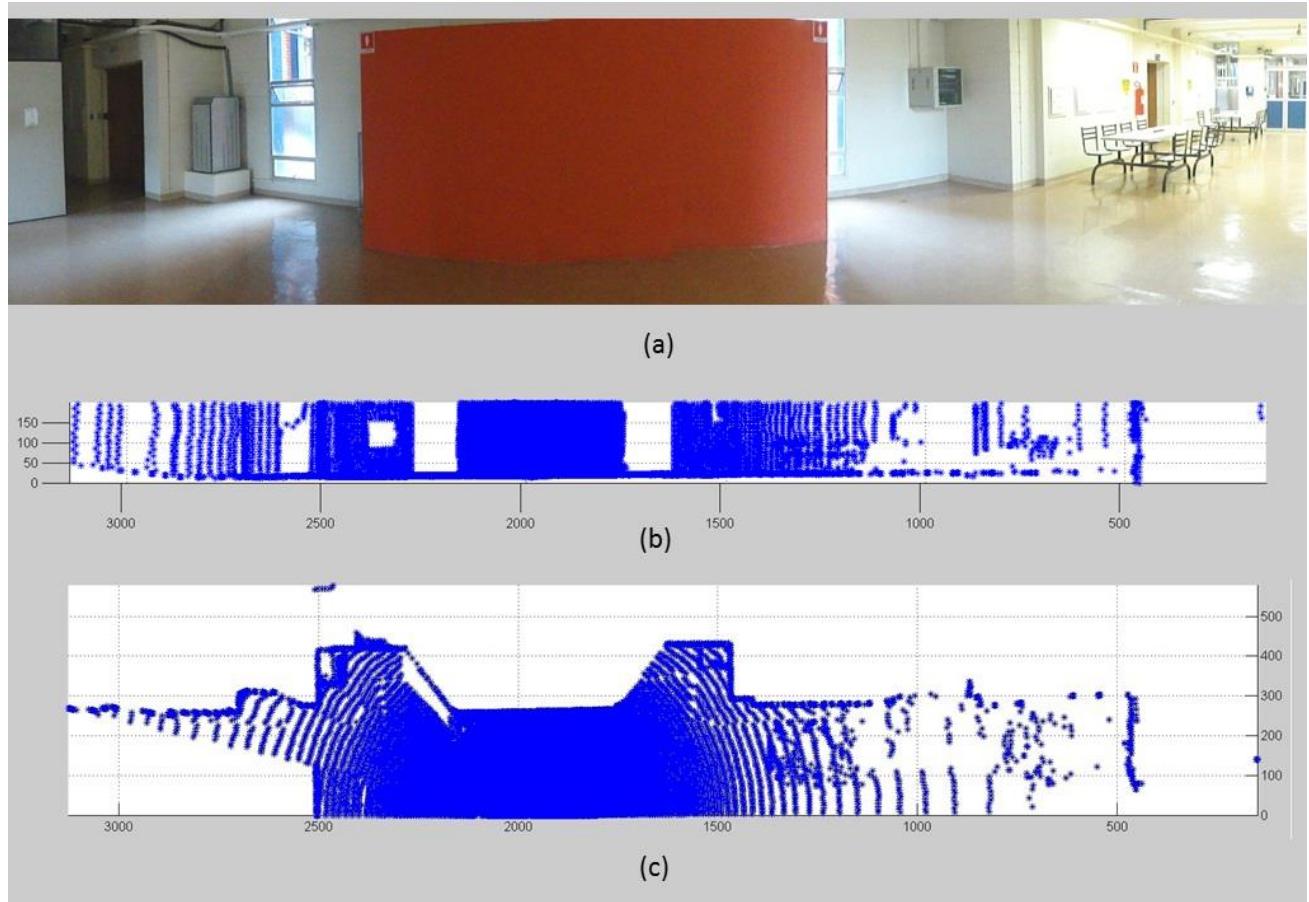


Figura 5.5 – Mapa sensorial do ESTUDO DE CASO I, escaneamento de um ambiente interno, estruturado, gerado a partir do Sistema de Percepção LMS-3D: (a) fotografia do ambiente (panorâmica de 180°); (b) vista frontal da nuvem de pontos do Mapa Sensorial; (c) vista superior.

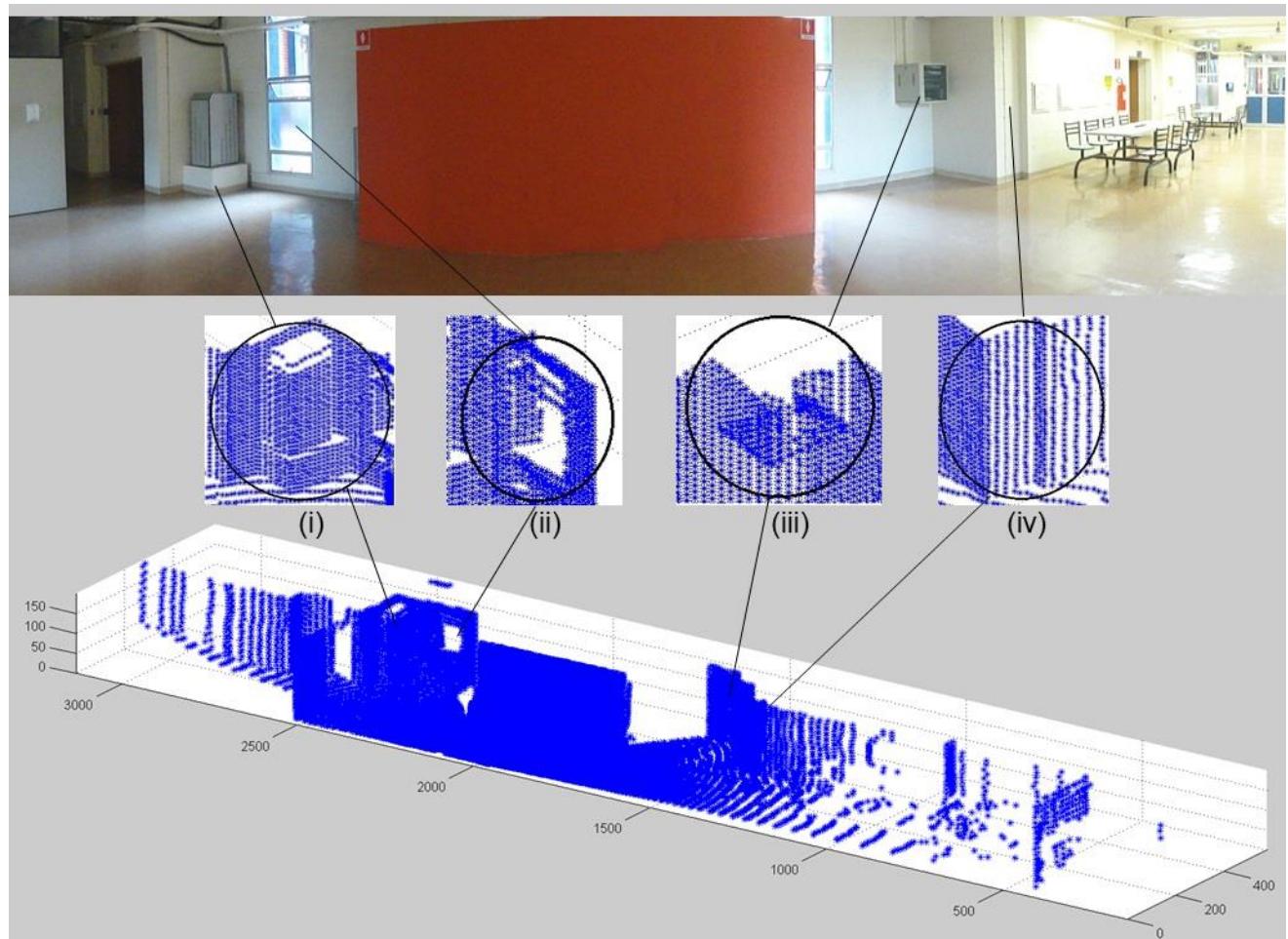


Figura 5.6 – Comparativo da fotografia e do Mapa Sensorial do ESTUDO DE CASO I, detalhes da nuvem de pontos com 4 casos particulares que evidenciam objetos: (i) plataforma e caixa metálica retangular (transformador em cima de uma plataforma de concreto); (ii) janela de vidro parcialmente aberta; (iii) caixa metálica retangular elevada do piso; (iv) detalhe das quinas de duas paredes.

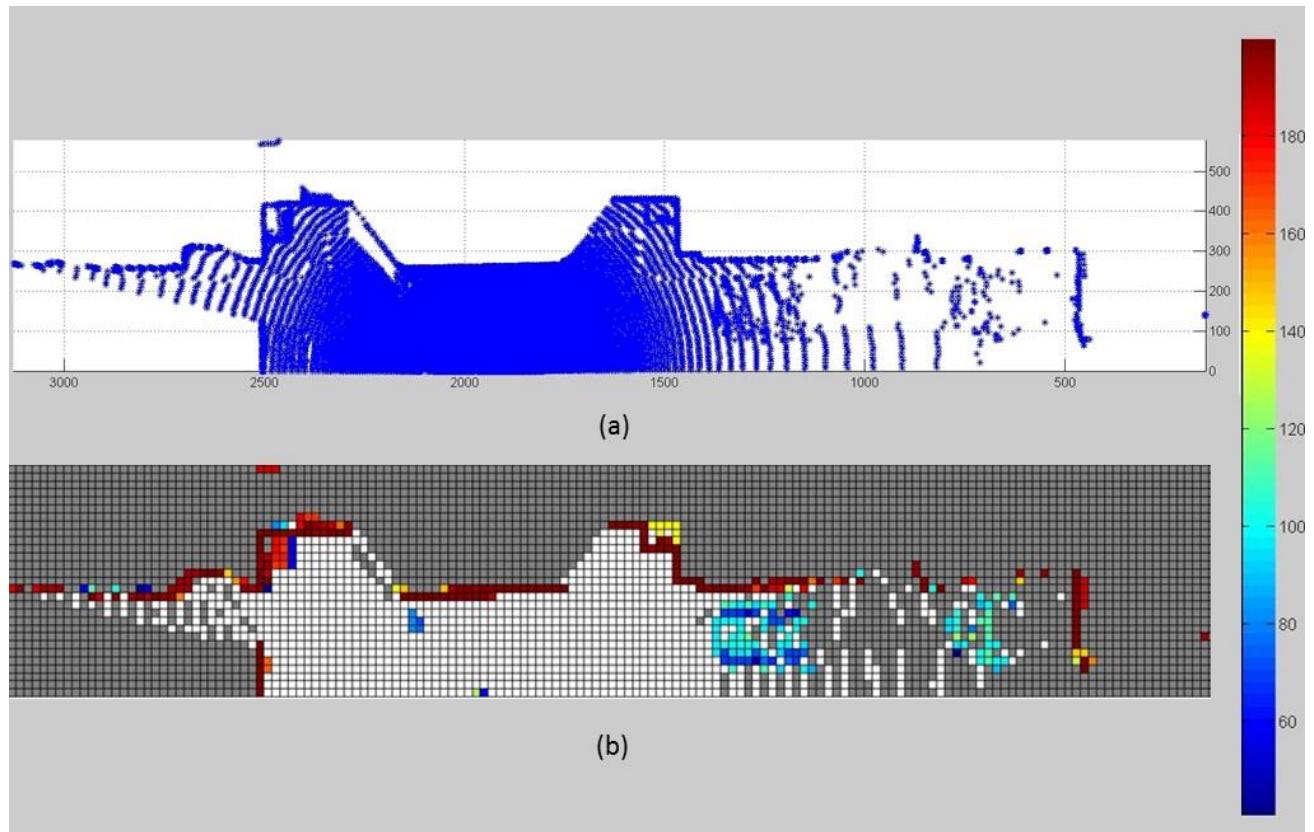


Figura 5.7 – Mapa de Grades de Ocupação (Mapa GO-2C-D) do ESTUDO DE CASO I comparado com o Mapa Sensorial (Sistema de Percepção LMS-3D): (a) vista superior do Mapa Sensorial; (b) Mapa de Grades de Ocupação 2C-D, com a barra de alturas em cores. As células são de 20x20 cm.

Na Figura 5.7, pode-se observar a utilização de cores dentro de uma determinada convenção e atribuição para identificar uma terceira dimensão (elevação) em cada célula. No mapa GO 2C-D, as células que não foram “percebidas” pelo sistema estão em cinza. É importante salientar que existem dois tipos de células cinzas: i) fora das áreas físicas percebidas (p.e. por trás das paredes, imperceptíveis pelo sensor do sistema); ii) fora da resolução do sistema de percepção, porém dentro da área próxima do sensor, (a resolução sempre será um limitante para este tipo de sistema).

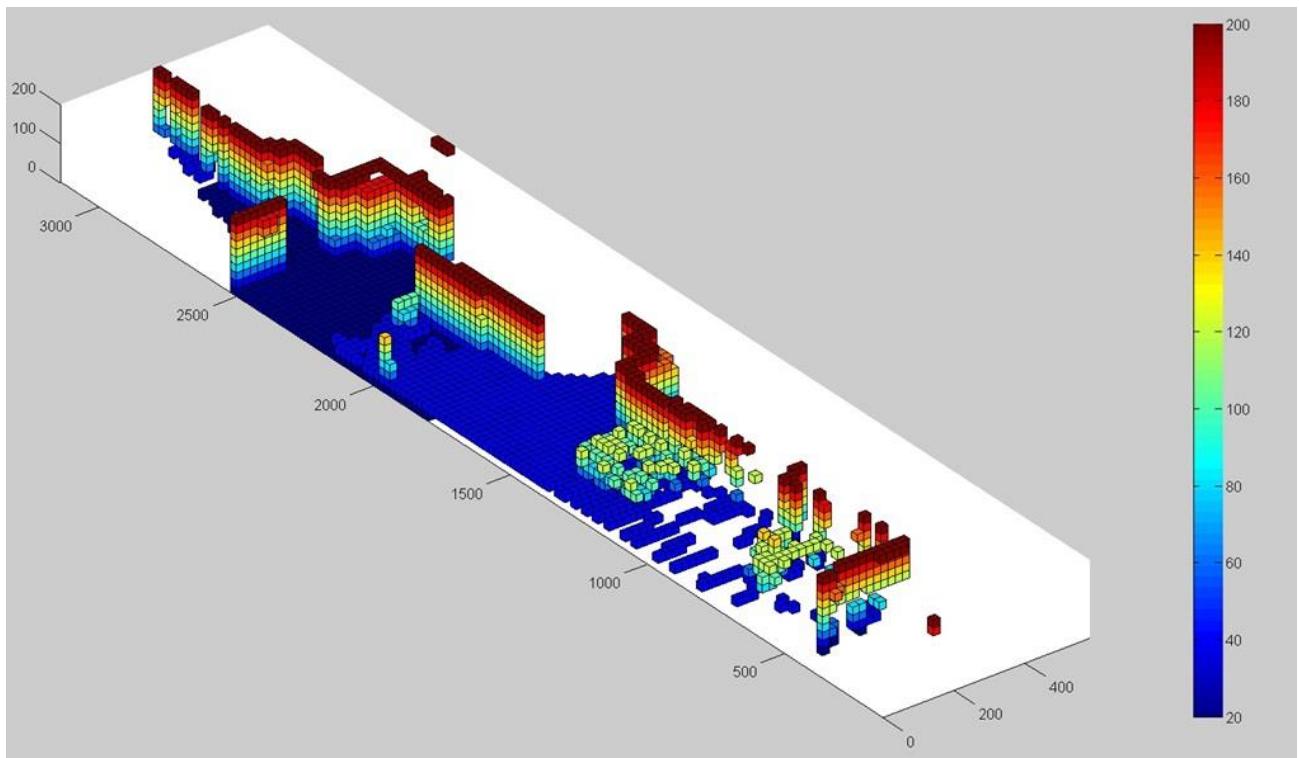


Figura 5.8 – Mapa de Grades de Ocupação (Mapa GO-3D) do ESTUDO DE CASO I, com a barra de alturas em cores. As células são de 20x20x20 cm.

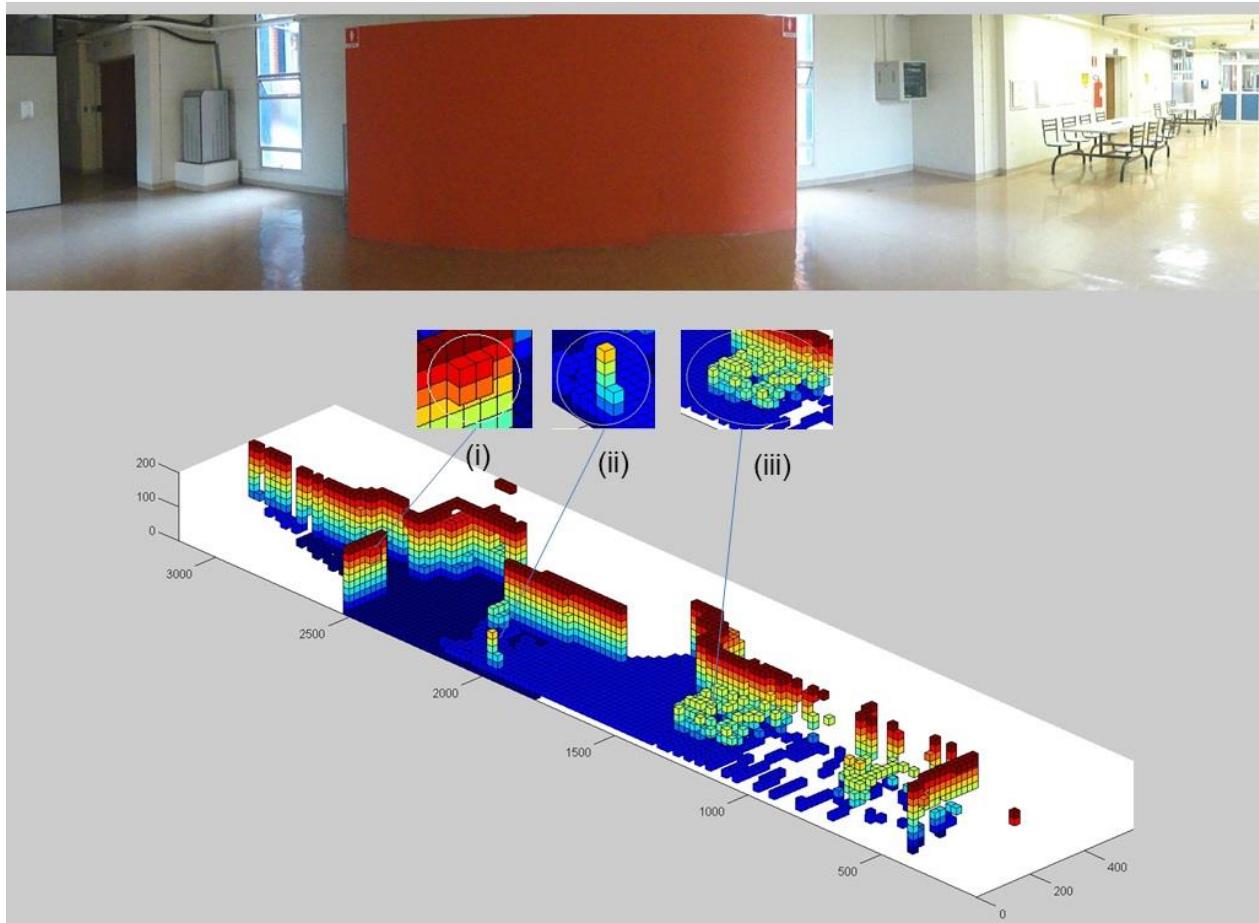


Figura 5.9 – Comparativo da fotografia panorâmica e do Mapa Grades de Ocupação (Mapa GO-3D) do ESTUDO DE CASO I, detalhes da formação de objetos a partir das células 3D (“tijolos”): (i) caixa de plástico retangular (depósito de líquido para limpeza); (ii) parte do tripé, que sustenta o Sistema LMS-3D; (iii) detalhe das cadeiras do lado direito do corredor. As células são de 20x20x20 cm.

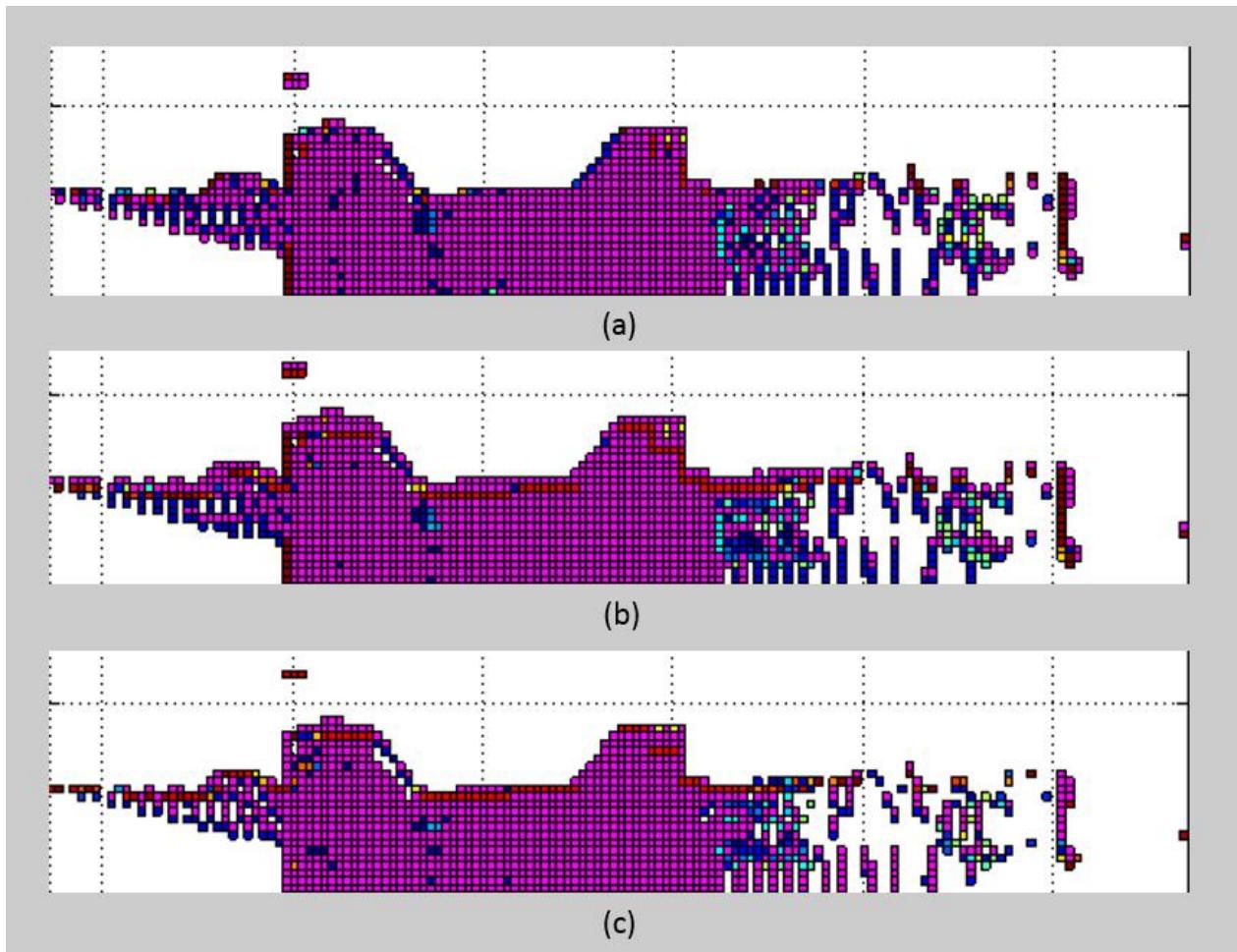


Figura 5.10 – Mapas Vetoriais (baseados em gradientes e tendências do movimento) do ESTUDO DE CASO I: (a) mapa vetorial  $p1$  (gradiente  $L$ ); (b) (a) mapa vetorial  $p2$  (gradiente  $SE$ ); (c) mapa vetorial  $p3$  (gradiente  $S$ ). As células são de 20x20 cm.

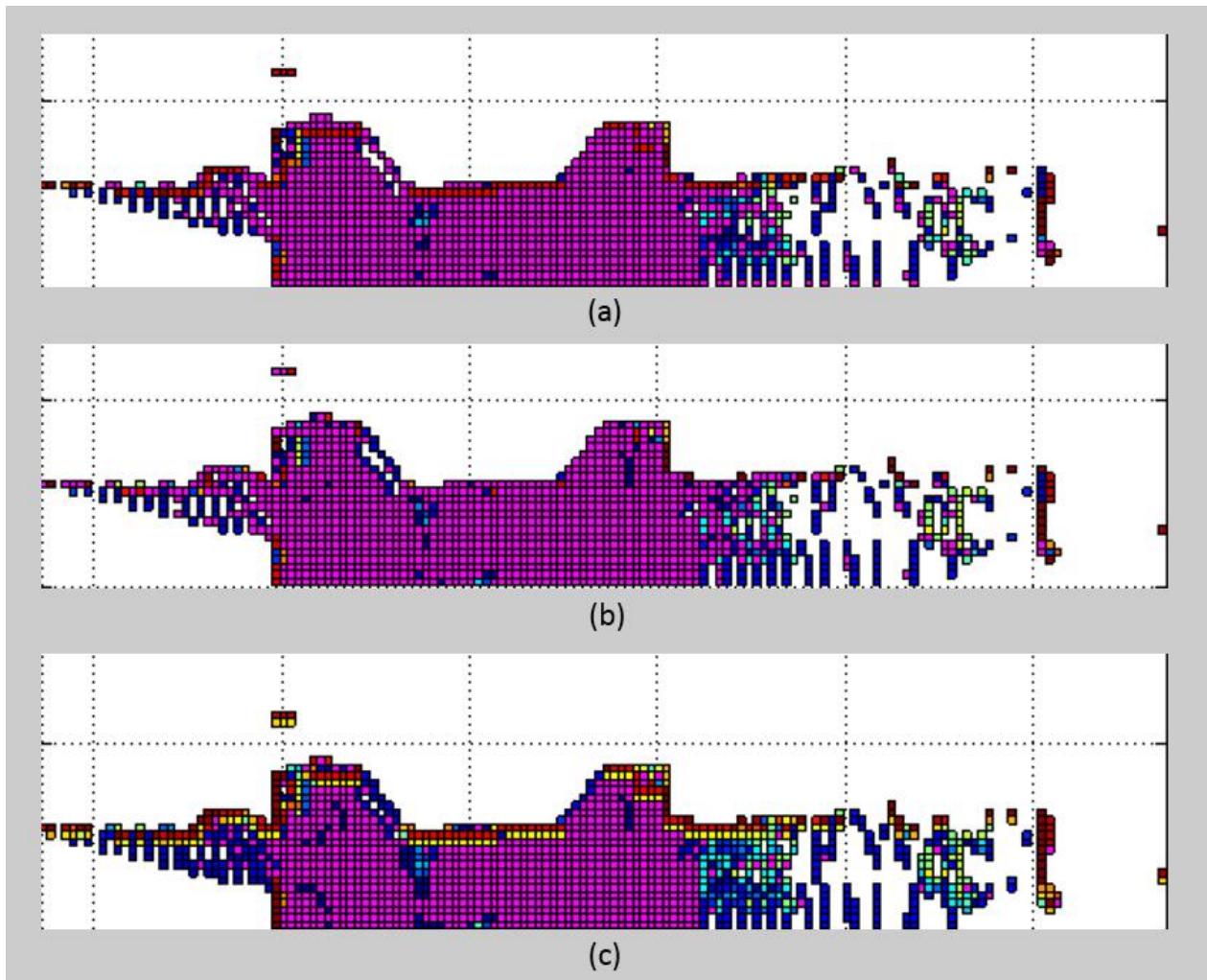


Figura 5.11 – Mapas Vetoriais (baseados em gradientes e tendências do movimento) do ESTUDO DE CASO I: (a) mapa vetorial  $p4$  (gradiente  $SO$ ); (b) mapa vetorial  $p5$  (gradiente  $O$ ); (c) mapa vetorial  $p_{max} = max$  (gradientes). As células são de 20x20 cm.

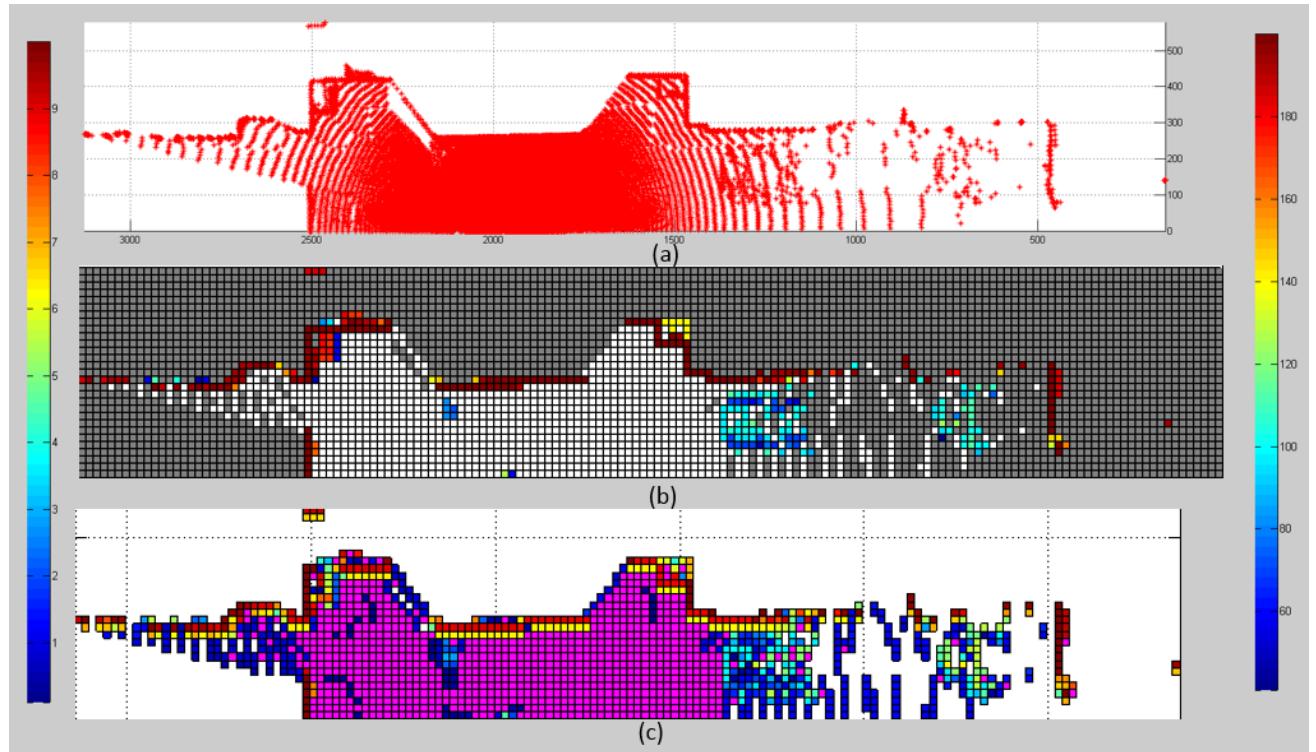


Figura 5.12 – Comparativo entre os mapas gerados para o ESTUDO DE CASO I: (a) Mapa Sensorial (Sistema de Percepção LMS-3D); (b) Mapa de grades de ocupação 2C-D, com a barra de alturas em cores (lado direito); (c) Mapa de vetores  $p_{max}$  (gradiente máximo), com barra de % gradiente (lado esquerdo). As células são de 20x20 cm.

Na Figura 5.12 podem ser comparados os três tipos de mapas (2D) gerados pelo sistema, o detalhe mais importante é referido à percepção de que a área de navegação continua (ANC) determinada por gradientes vetoriais é menor do que a área de navegação por GO. O mapa da Figura 5.12c é um mapa formado pelas áreas que atendem as 5 tendências de movimento (mapas vetoriais), evidentemente a possibilidade de movimento por parte do robô estará mais restrita.

### 5.3.2 ESTUDO DE CASO II: Representação sensorial e mapeamento utilizando grades de ocupação (GO-2C-D e GO-3D) e gradientes vetoriais de ambientes *indoor* com rampas

Em um segundo caso, escaneou-se um corredor com rampa contínua e prolongada, dentro de um ambiente interno e estruturado. A necessidade do estudo de rampas ou escadas, dentro de uma representação de grades de ocupação, deu-se devido à limitação que pode existir entre o ângulo de inclinação da rampa e as limitações do sistema robótico. Na Tabela 5.4 são apresentadas as principais características das medições realizadas para este exemplo.

Tabela 5.4 - Resumo das características do escaneamento do Estudo de Caso II (Referência às Figuras 5.13 a 5.17).

Dados Técnicos / Características	Valor	Unidade
Ângulo total horizontal de escaneamento (H)	100	[°]
Resolução angular horizontal (RH)	1	[°]
Ângulo total vertical de escaneamento (V)	100	[°]
Resolução angular vertical (RV)	1	[°]
Número de pontos (N)	10.201	[pontos]
Tempo de escaneamento (T)	-	[s]
Resolução da medição	10	[mm]
Precisão da medição	± 35	[mm]
Erro Sistemático	± 5	[cm]
Erro Estatístico	10	[mm]

Nas Figuras 5.13 a 5.17 são apresentados os mapas digitais resultados do escaneamento de um ambiente adequado para o estudo do problema proposto no CASO II (rampas). São apresentados o mapa sensorial do ambiente, mapas que utilizam GO em 2D com elevação em cores, mapas de GO com 3D, e cinco casos de mapas com gradientes vetoriais, assim como as comparações correspondentes.

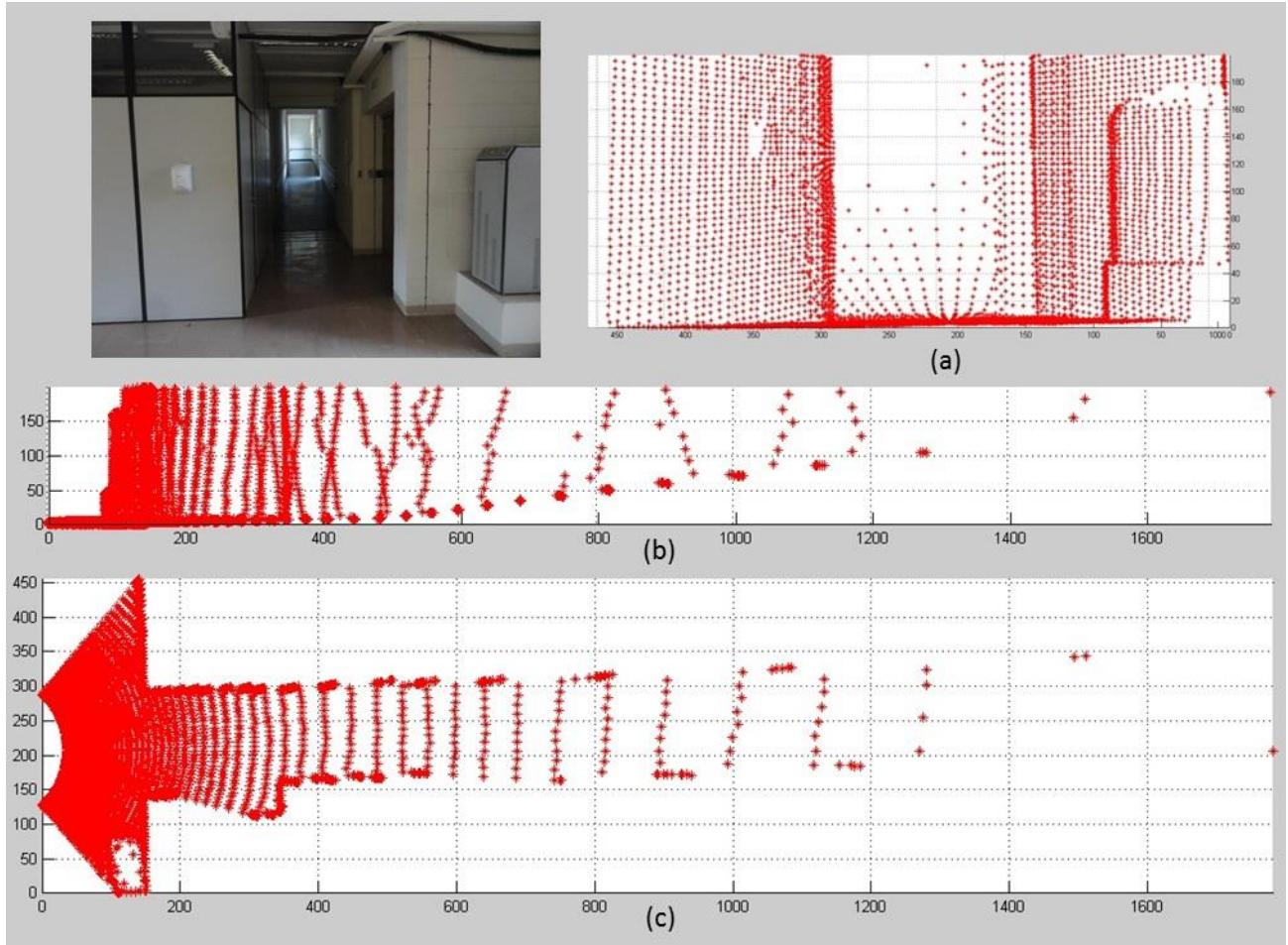


Figura 5.13 – Mapa sensorial do ESTUDO DE CASO II, escaneamento de um ambiente interno, estruturado, gerado a partir do Sistema de Percepção LMS-3D: fotografia do ambiente; (a) Vista frontal da nuvem de pontos; (b) vista lateral; (c) vista superior.

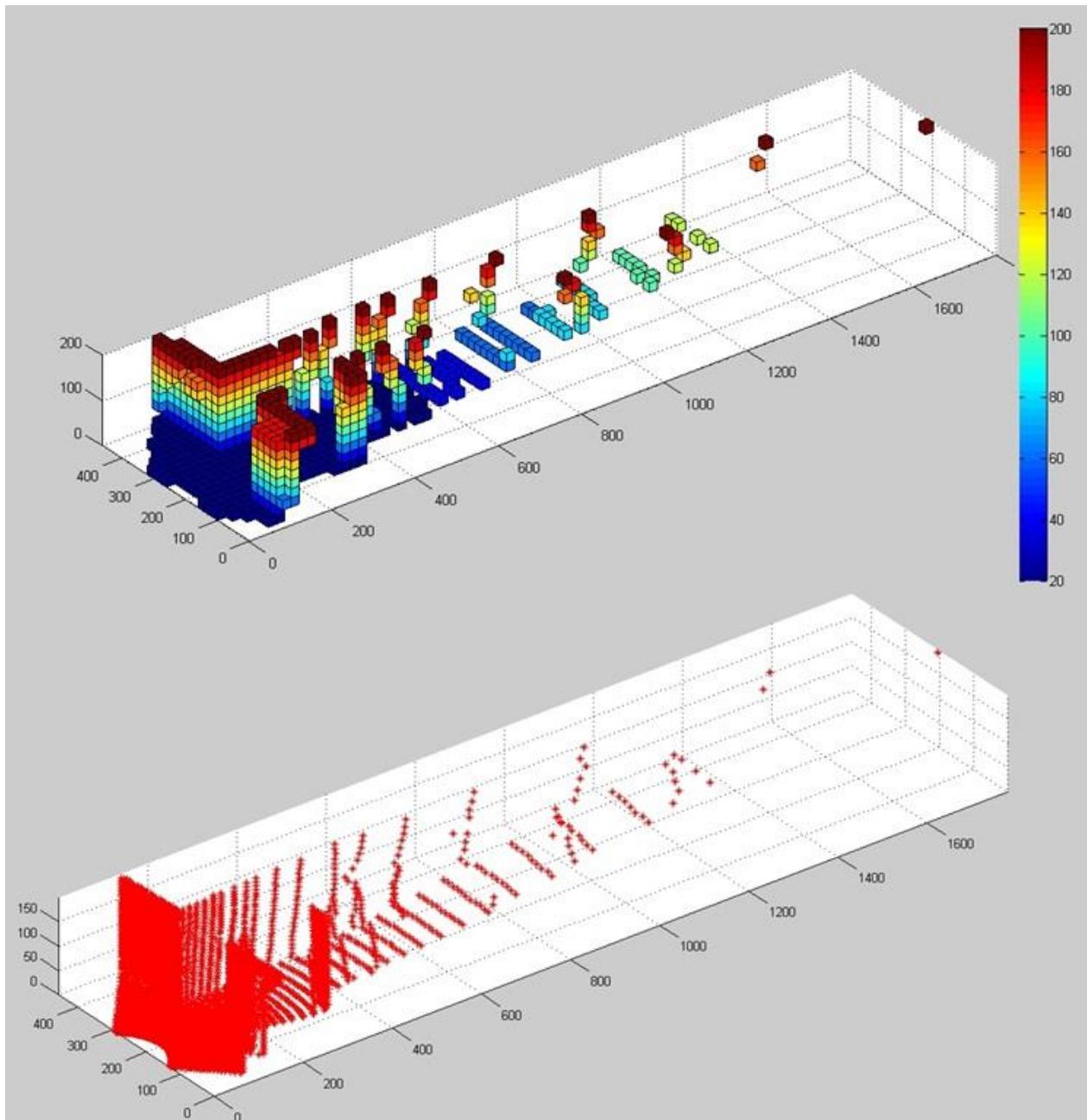


Figura 5.14 – Mapa de Grades de Ocupação (Mapa GO-3D) do ESTUDO DE CASO II, com a barra de alturas em cores, comparado com seu Mapa sensorial. As células são de 20x20x20 cm.

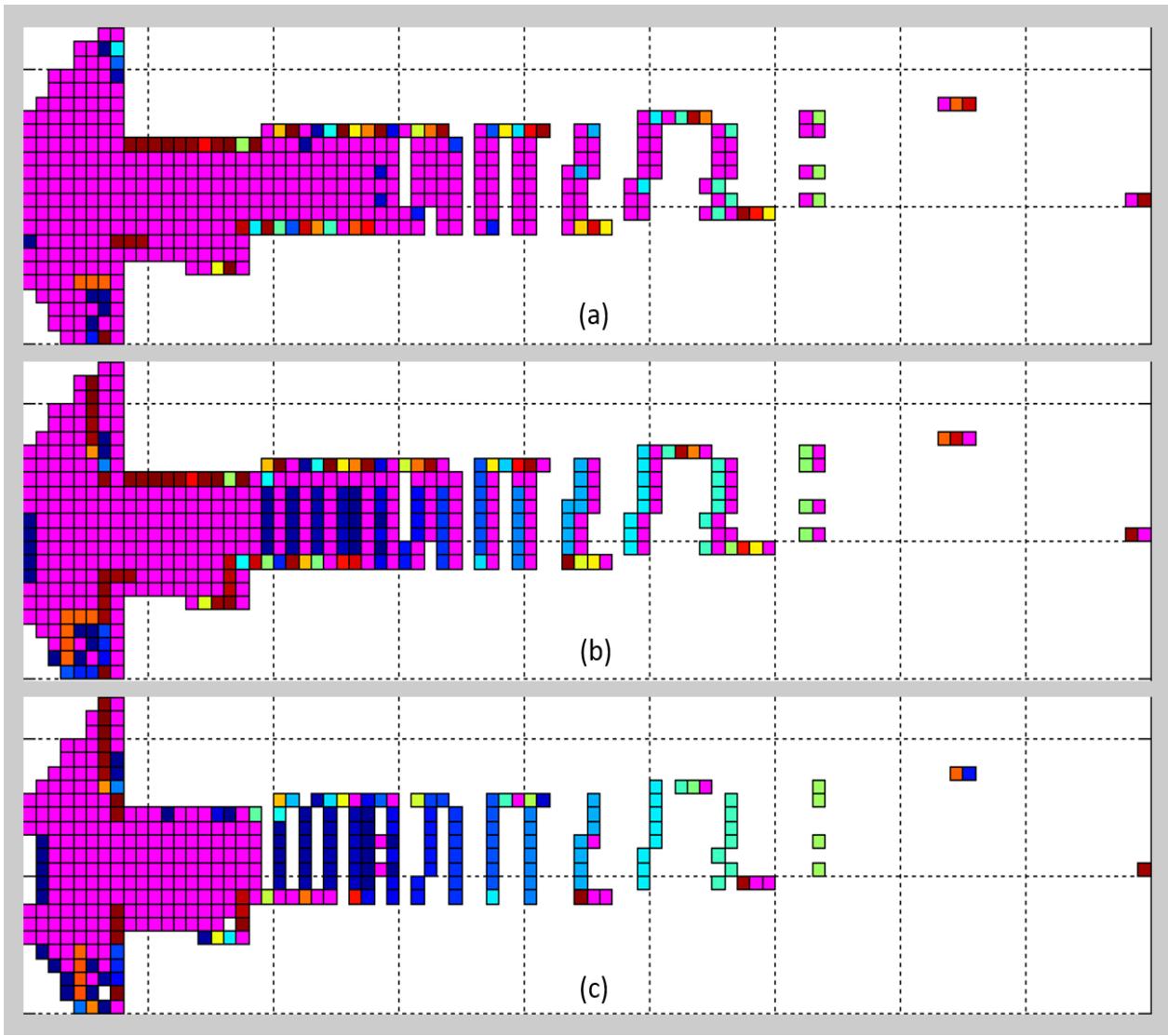


Figura 5.15 – Mapas Vetoriais (baseados em gradientes e tendências do movimento) do ESTUDO DE CASO II: (a) mapa vetorial  $p1$  (gradiente  $L$ ); (b) mapa vetorial  $p2$  (gradiente  $SE$ ); (c) mapa vetorial  $p3$  (gradiente  $S$ ). As células são de 20x20 cm.

Na Figura 5.15 se evidencia a influência da direção dos gradientes vetoriais, a cor magenta mostra uma área possível de ser navegada, dada uma determinada restrição do movimento, por exemplo direção Sul-Norte, como é o caso da Figura 5.15a.

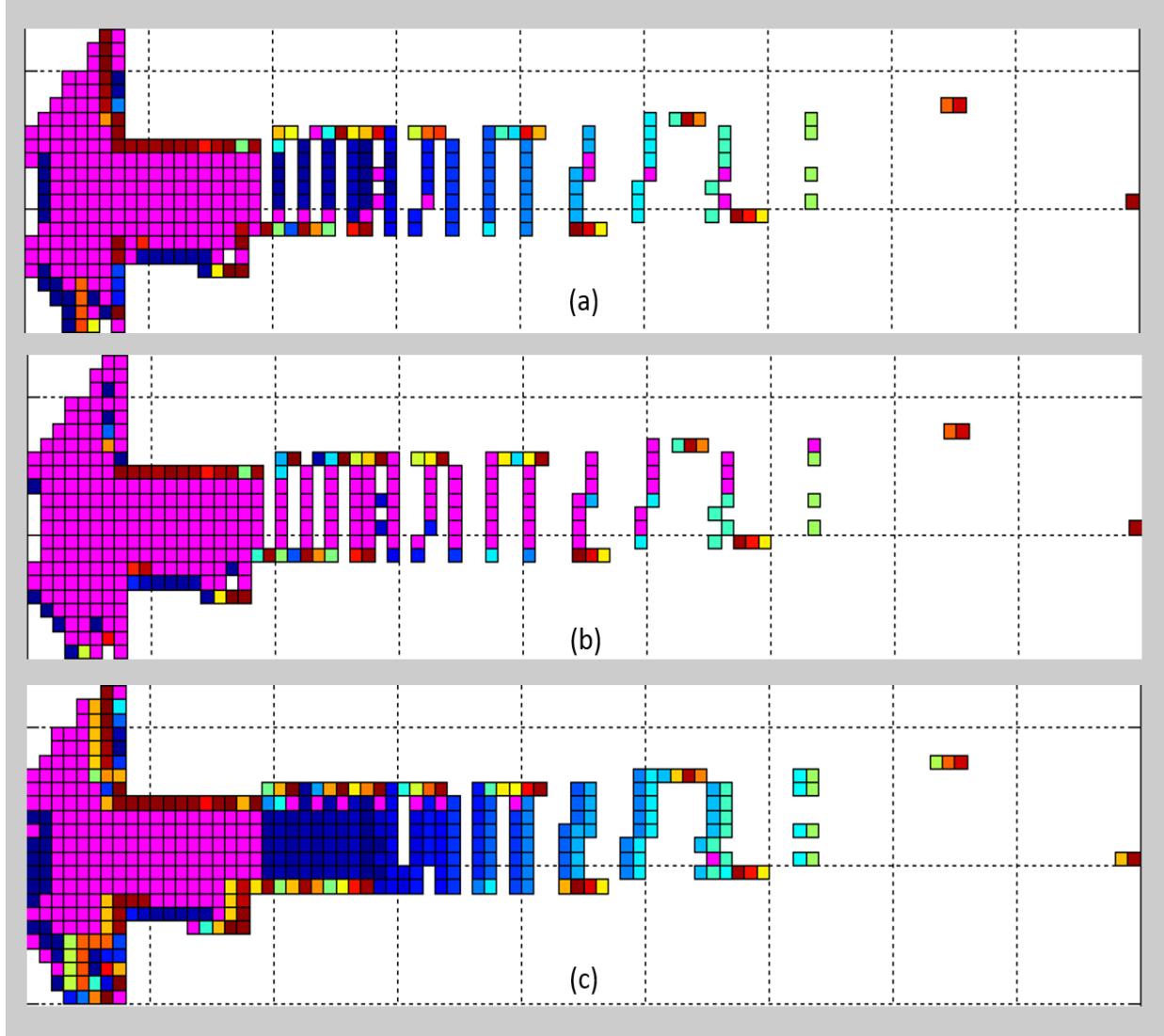


Figura 5.16 – Mapas Vetoriais (baseados em gradientes e tendências do movimento) do ESTUDO DE CASO II: (a) mapa vetorial  $p_4$  (gradiente  $SO$ ); (b) mapa vetorial  $p_5$  (gradiente  $O$ ); (c) mapa vectorial  $p_{max} = max$  (gradientes). As células são de 20x20 cm.

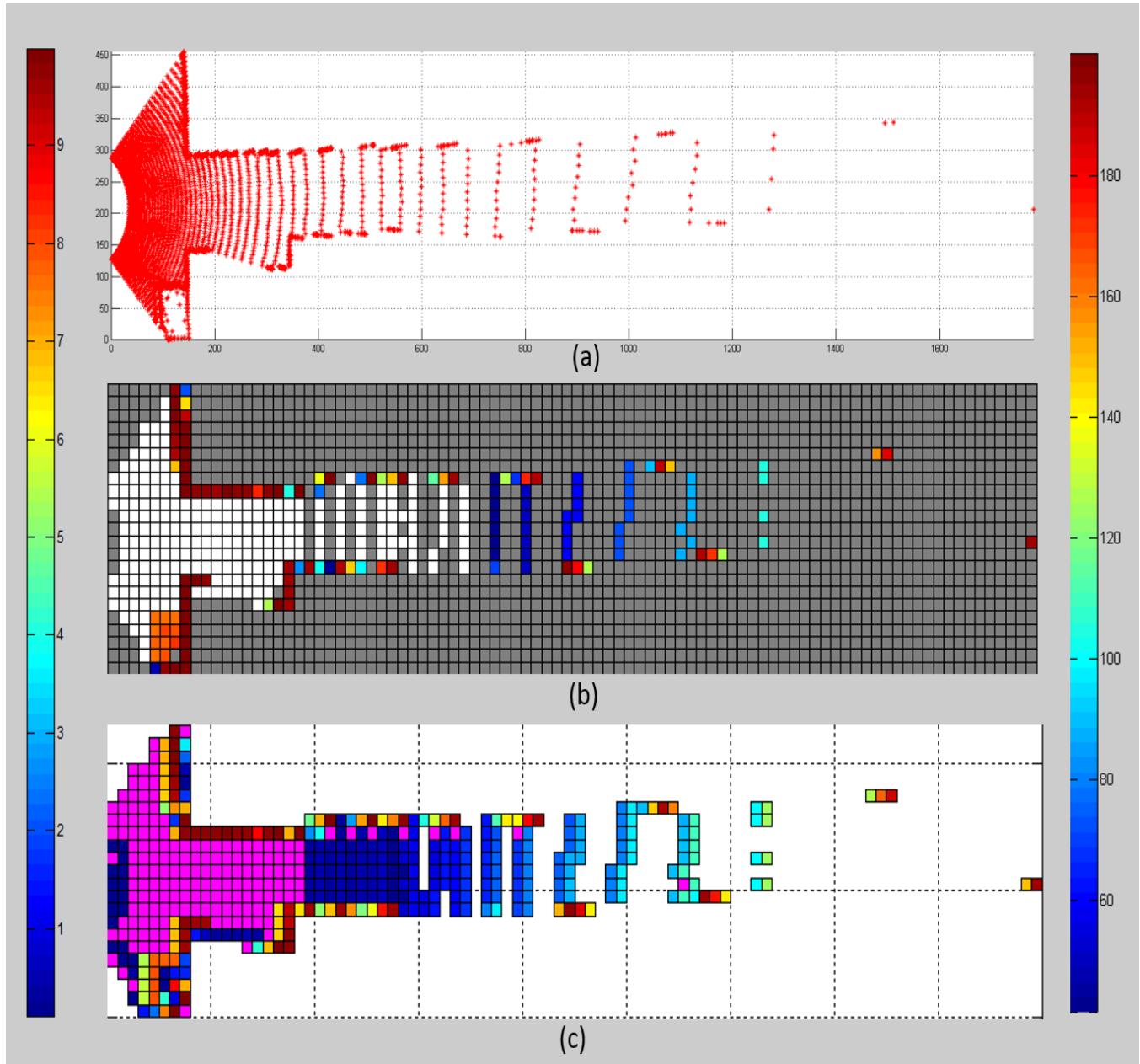


Figura 5.17 – Comparativo entre os mapas gerados para o ESTUDO DE CASO II: (a) Mapa Sensorial (Sistema de Percepção LMS-3D); (b) Mapa de grades de ocupação 2C-D, com a barra de alturas em cores (lado direito); (c) Mapa de vetores  $p_{max}$  (gradiente máximo), com barra de % gradiente (lado esquerdo). As células são de 20x20 cm.

### 5.3.3 ESTUDO DE CASO III: Representação sensorial e mapeamento por grades de ocupação (GO-2C-D e GO-3D) e gradientes vetoriais de um ambiente *indoor* com degraus

Um terceiro caso apresenta o escaneamento de uma escada de cimento com formato em “u”, dentro de um ambiente interno e estruturado. O objetivo foi analisar o comportamento dos algoritmos de geração de mapas por gradientes vetoriais, a fim da geração de áreas de navegação continuas (ANC).

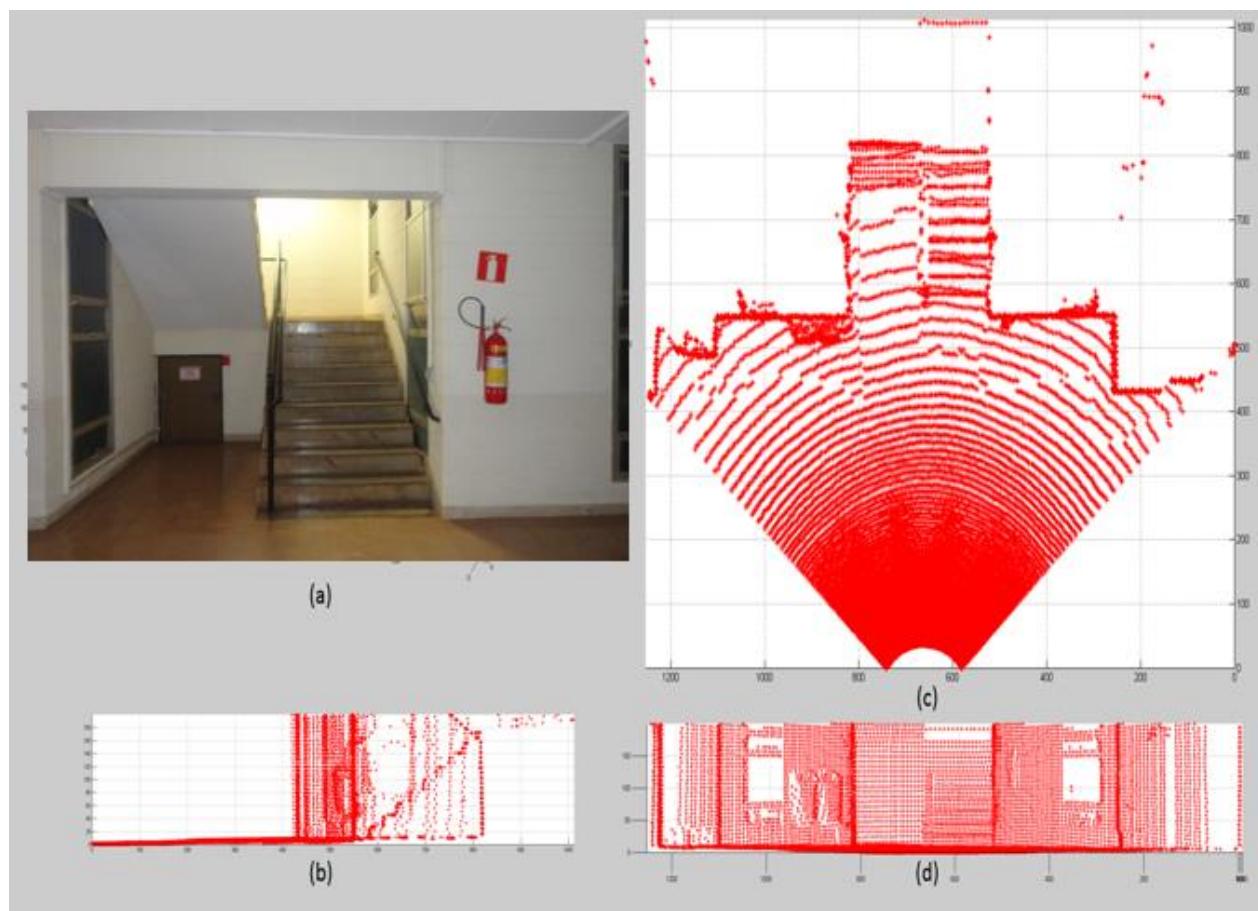


Figura 5.18 – Mapas sensoriais do ESTUDO DE CASO III, escaneamento de um ambiente interno, estruturado, gerado a partir do Sistema de Percepção LMS-3D: (a) Fotografia do ambiente para o CASO III; (b) detalhe vista lateral (observar as escadas); (c) vista superior; (d) vista frontal.

Nas Figuras 5.18 a 5.22 são apresentados os mapas digitais resultados do escaneamento de um ambiente adequado para o estudo do problema proposto no CASO III (degraus-escadas). São apresentados o mapa sensorial do ambiente, mapas que utilizam GO em 2D com elevação em cores, mapas de GO-3D, e cinco casos de mapas com gradientes vetoriais, assim como as comparações correspondentes.

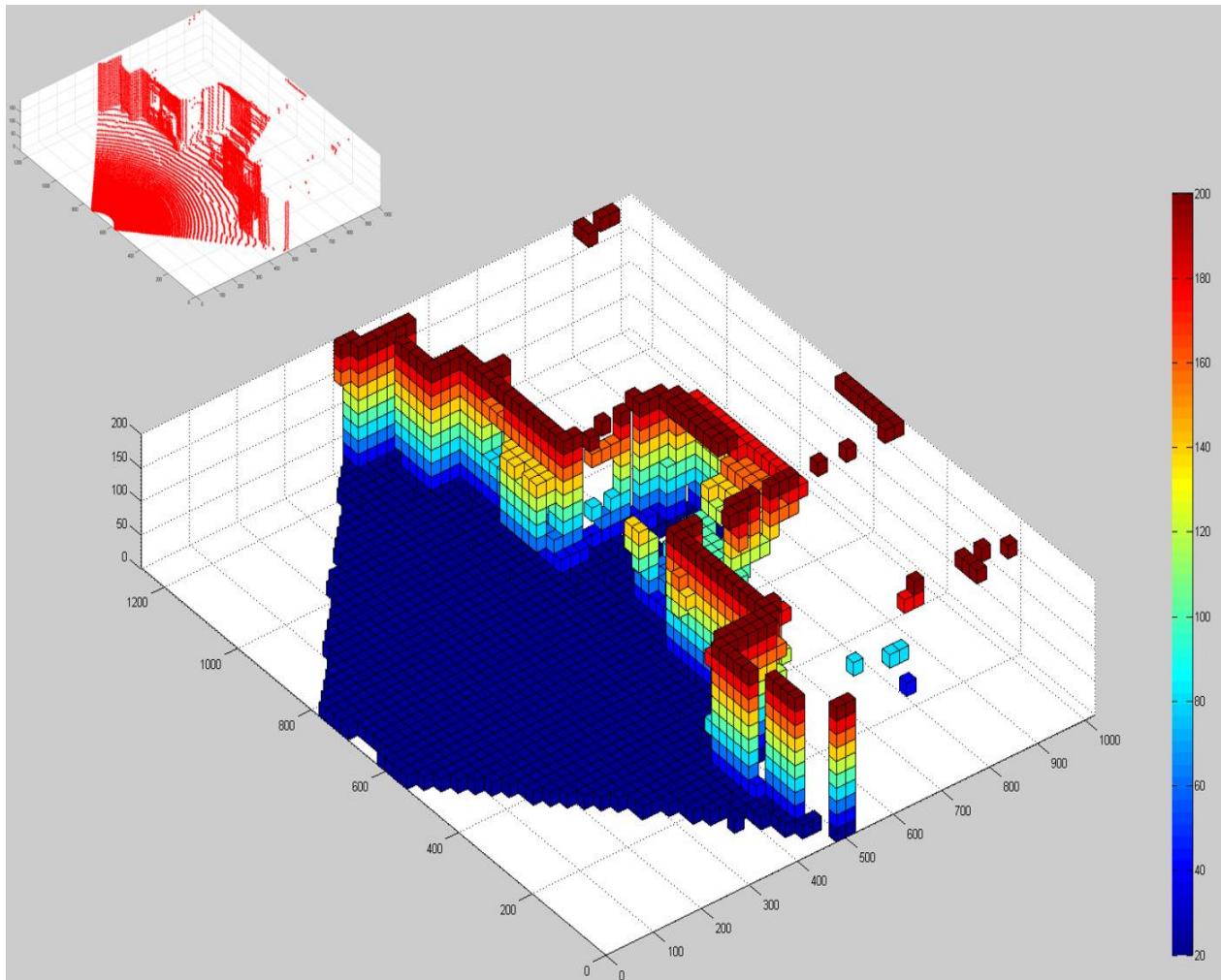


Figura 5.19 – Mapa de grades de ocupação (Mapa GO-3D), ESTUDO DE CASO III, com a barra de alturas em cores, comparado com seu Mapa sensorial. As células são de 20x20x20 cm.

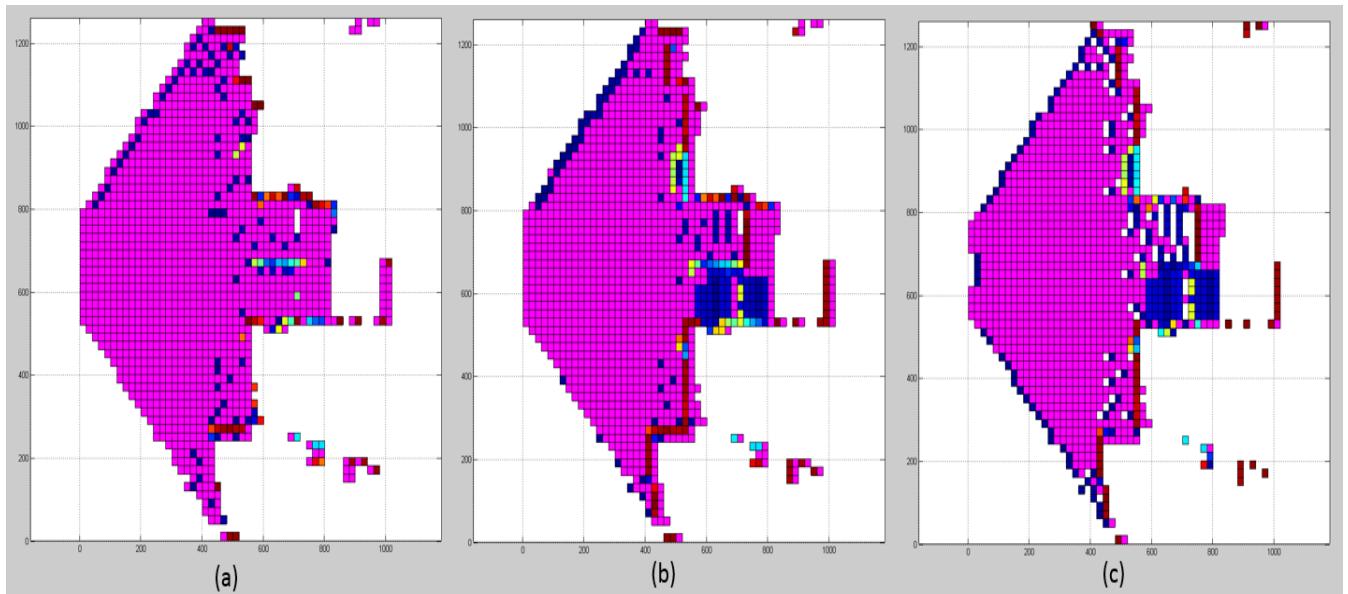


Figura 5.20 – Mapas Vetoriais (baseados em gradientes e tendências do movimento) do ESTUDO DE CASO III: (a) mapa vetorial  $p1$  (gradiente  $L$ ); (b) mapa vetorial  $p2$  (gradiente  $SE$ ); (c) mapa vectorial  $p3$  (gradiente  $S$ ). As células são de 20x20 cm.

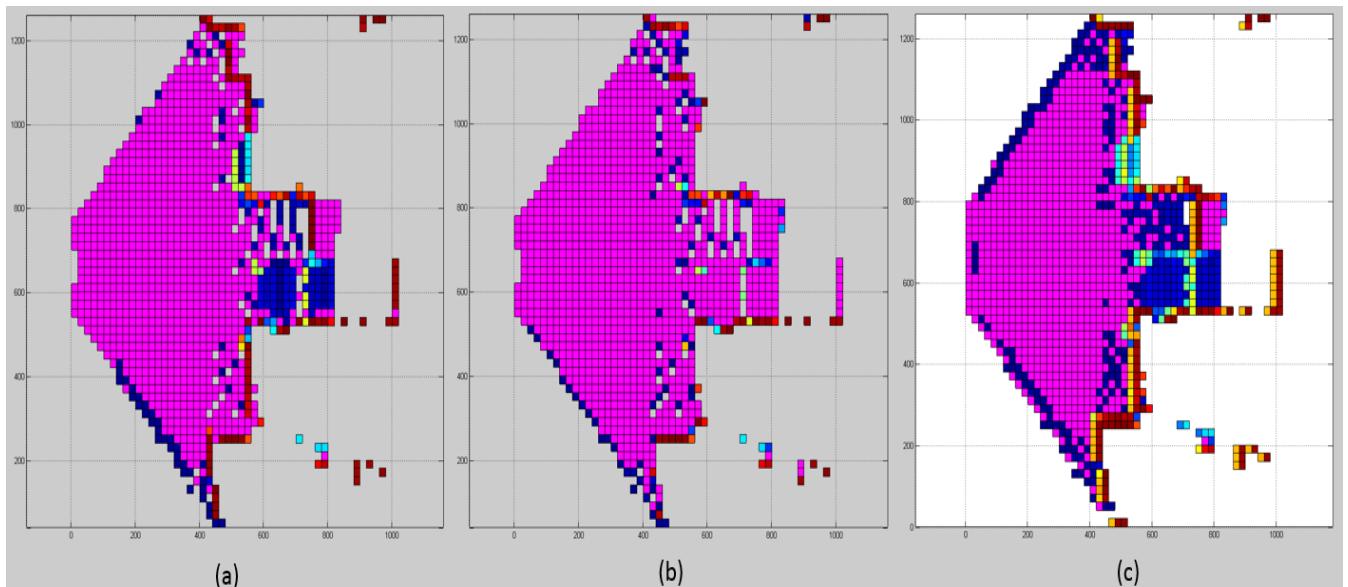


Figura 5.21 – Mapas Vetoriais (baseados em gradientes e tendências do movimento) do ESTUDO DE CASO III: (a) mapa vetorial  $p4$  (gradiente  $SO$ ); (b) mapa vetorial  $p5$  (gradiente  $O$ ); (c) mapa vetorial  $p_{max} = max$  (gradientes). As células são de 20x20 cm.

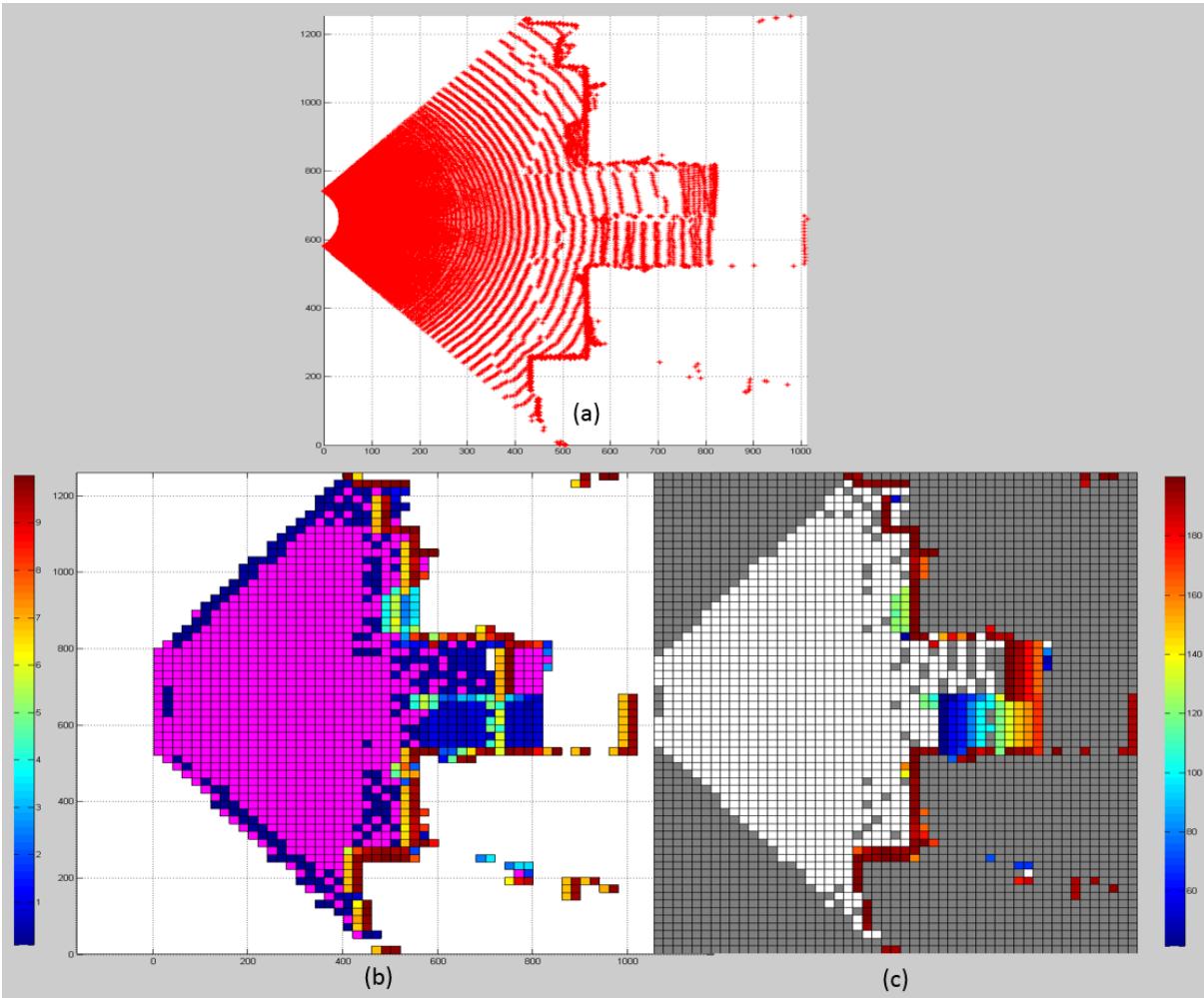


Figura 5.22 – Comparativo entre os mapas gerados para o ESTUDO DE CASO III: (a) mapa sensorial (Sistema de Percepção LMS-3D); (b) Mapa de vetores  $p_{max}$  (gradiente máximo), com barra de % gradiente (lado esquerdo); (c) Mapa de grades de ocupação 2C-D, com a barra de alturas em cores (lado direito). As células são de 20x20 cm.

O presente capítulo primeiro apresentou o sistema de sensoriamento LMS-3D (detalhes e características) com alguns exemplos de escaneamento a fim de explorar a máxima capacidade do mesmo. Em um segundo momento foram apresentados três (03) casos específicos de estudo com foco em três problemáticas diferentes: i) paredes paralelas (oclução), ii) rampas (continuidade), iii) escadas (degraus-suspensos). Para cada caso foram apresentados mapas sensoriais, mapas baseados em GO em 2D com elevação em cores e 3D, e mapas por gradientes vetoriais, os mapas foram comparados visualmente.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os principais objetivos propostos para este trabalho foram alcançados: (i) desenvolvimento de um sistema de percepção baseado em LIDAR a um custo baixo; (ii) Caracterização de ambientes em 3D. Um primeiro protótipo do sensor LMS-3D foi construído e testado. Um *software*/programa foi implementado como interface entre o sistema e o operador. Chamado de LMS23, este *software* gerencia os algoritmos do sistema. Constitui uma contribuição importante ao grupo de pesquisa do Laboratório de Mobilidade Autônoma (LMA).

No contexto do LMA, o Sistema de percepção LMS-3D foi construído como um primeiro protótipo a ser acoplado a um sistema robótico (veículo autônomo). Para efeito do desenvolvimento do sistema os experimentos iniciais foram realizados com o equipamento montado sobre um tripé, trabalhando assim num ambiente controlado e estático.

Uma adaptação da metodologia para gerar mapas baseados em grades de ocupação (com embasamento da robótica probabilística) foi proposta. Uma das contribuições do presente trabalho diz respeito à geração de mapas por grades de ocupação 2D, com informações de profundidade em escala colorida, denominados mapas baseado em grades de ocupação de duas dimensões, incluindo uma terceira dimensão em cores (Mapa GO-2C-D). Os mapas gerados se mostraram coerentes com a realidade do ambiente explorado.

Outra contribuição foi a utilização de gradientes vetoriais na geração de mapas de navegação, apresentando robustez na caracterização de áreas contínuas. A novidade está na geração de mapas que contemplam tendências de movimentos, ou seja, quando se conhece a *priori* a trajetória do sistema robótico, ou a orientação obrigatória que o sistema terá que realizar para uma determinada tarefa. Os mapas gerados através do algoritmo de gradientes vetoriais ampliam o espaço de navegação, encontram áreas contínuas e acrescentam flexibilidade para ajuste do limiar, de acordo com a característica da plataforma robótica utilizada.

Alguns exemplos clássicos foram testados:

## ESTUDO DE CASO I:

Os mapas sensoriais se mostraram coerentes, apresentando relativa rapidez na construção da representação 3D do ambiente. Os mapas GO-2-C-D se mostraram mais rápidos e confiáveis, pois apresentaram com clareza áreas de navegação e ocupadas, assim como outros detalhes do ambiente;

Houve dificuldade quanto ao alinhamento do sensor com o ambiente, mesmo estruturado. Contudo, não foram realizadas correções de alinhamento, devido à certeza de que o sistema proposto poucas vezes estaria alinhado com as estruturas de referência, deixando esta tarefa para o pós-processamento dos resultados;

Mapas de GO-3D se mostraram coerentes com a representação do ambiente, dando inclusive detalhes que, inicialmente, não se esperavam obter;

Durante o escaneamento, houve “perda” de pontos, uma vez que o ambiente escaneado possuía muitas janelas com vidros (e abertas), de tal forma que os feixes do laser saíram para o exterior;

Problemas de oclusão, como as paredes paralelas, foram facilmente diferenciáveis utilizando sensores tipo LIDAR (2D e 3D) no mapa de representação.

Neste caso de estudo, a utilização de mapas vetoriais foi menos aproveitada, devido a que a área era plana, mas o mapa vetorial era coerente com o mapa GO 2C-D.

## ESTUDO DE CASO II:

A percepção de rampas e escadas pode ser evidenciada com a utilização do sensor tipo LIDAR (2D e 3D).

Rampas, dependendo da sua inclinação, podem ser consideradas obstáculos ou áreas de navegação. Com mapas de grades de ocupação 2C-D, o sistema robótico pode decidir se se trata de área navegável ou não, dependendo de suas características.

A partir da utilização de mapas de GO coloridos (GO-2-C-D) encontrou-se uma forma de representação potencialmente importante para sistemas robóticos. A grade de cores utilizada para diferenciar a altura dos objetos em que os feixes do *scanner* estavam “tocando” parece ser muito consistente para a representação de rampas (contínuas ou discretas). No exemplo estudado neste trabalho, pôde-se verificar que cores contínuas em áreas próximas podem representar áreas contínuas (comunicadas ou não) levemente inclinadas.

Os mapas de gradientes vetoriais foram desenvolvidos para poder lidar especificamente com este caso. A utilização de mapas vetoriais mostra que rampas, mesmo sendo áreas inclinadas planas, seriam potenciais áreas navegáveis (sempre dependendo da sua inclinação).

Devido às características do sensor (mapeamento discreto) algumas células do mapa podem não ser preenchidas, em particular quando existem rampas com pequenas inclinações.

### ESTUDO DE CASO III:

A percepção de escadas e paredes inclinadas ou objetos pendurados puderam ser evidenciadas com a utilização do sensor tipo LIDAR (3D);

Objetos suspensos, como o caso das escadas superiores, foram percebidos em todos os mapas gerados. No caso dos mapas 2D, os objetos foram entendidos como elevações e não como suspensos, está é a grande vantagem dos mapas 3D que constroem um ambiente digital de forma discreta mas “idêntica” ao ambiente real;

É importante ressaltar que os mapas por gradientes corresponderam com a disposição das grades, e neste sentido, as grades ajudaram a evidenciar o potencial deste tipo de mapas.

## 6.1 Trabalhos futuros

- Desenvolvimento e implementação de uma placa de controle para o sistema do tipo “*plug and play*”, que facilite a utilização deste tipo de sistema em qualquer área da engenharia.
- Utilização de outras configurações (Sistema LIDAR – 3D) capazes de responder rapidamente às necessidades de sistemas de navegação, modificando/otimizando ângulos de escaneamento, a fim de permitir rapidez e robustez ao sistema.
- Utilização de outros sensores LIDAR 3D para gerar os mapas vetoriais e de ocupação.
- Trabalhar o sistema de acoplamento (fusão de dados) com sistemas de monovisão (e visão estéreo). Um primeiro trabalho com esse objetivo foi realizado pelo aluno João Baldo (com orientação do Prof. Dr. Pablo Siqueira Meirelles).
- Implementação de algoritmos baseados em grades de ocupação (2D, 2C-D, 3D) para fusão de dados vindos de outros sistemas de sensoriamento (sonares, câmeras, etc).
- Implementação de estratégias de navegação dentro dos mapas gerados.
- Implementação de um sistema de sensoriamento baseado no acoplamento de um sistema LMS-3D com sensores inerciais (bússolas, acelerómetros) a fim de explorar a construção otimizada de mapas de gradientes vetoriais baseados (*a priori*) na tendência do movimento do robô autônomo.
- Implementação de um Sistema LMS-3D em um sistema robótico (semi-) autônomo.

## Referências

ÁLVAREZ J. M., LOPEZ A. M. Road Detection Based on Illuminant Invariance, **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, p.184-193, 2011.

ALVAREZ, Jácobo Justo E. **Desenvolvimento de um Robô Autônomo Móvel Versátil utilizando arquitetura Subsumption**. 2001. 139p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas – SP.

ALVAREZ-JÁCOBO, J. E.; MEIRELLES, P. S.; RESENDIZ, A. J. Implementación de una Plataforma Móvil Modular versátil como herramienta para la investigación en Robótica Autónoma Móvil. In: II Congreso de Ingeniería Mecánica, 2009, Queretaro. **Revista Electronica en Ingenieria Mecanica**. Queretaro: ITQuantum, v. 14. p. 73-88, 2009.

ANDERT, Franz. Drawing stereo disparity images into occupancy grids: measurement model and fast implementation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, 2009. St. Louis, USA. **Proceedings of ICIRS, 2009**, p. 5191-5197.

ARQUILLA, J.; RONFELDT, D. Swarming and the Future of Conflict. Santa Mónica, California: RAND & National Defense Research Institute, United States Department of Defense. p. 25-26. ISBN 0-8330-2885-5, (2000) disponível:  
[http://www.rand.org/pubs/document\\_briefings/2005/RAND\\_DB311.pdf](http://www.rand.org/pubs/document_briefings/2005/RAND_DB311.pdf), no dia 20-09-2012.

BAKAMBU, Joseph Nsasi; GEMME, Sébastien; DUPUIS, Erick. Rover localization through 3D terrain registration in natural environments. In: IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, 2006. Beijing, China. **Proceedings of 2006 ICIRS**, p. 4121-4126.

BONIN-FONT, F.; ORTIZ, A.; OLIVER, G. Visual Navigation for Mobile Robots: A Survey. **Journal of Intelligent and Robotic Systems**, p. 263-296, 2008.

BORENSTEIN, J.; KOREN, Y. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots. **IEEE Trans. Syst. Man Cybern.** Vol. 19(5), p.1179–1187, 1989.

BRAGA, N.C. Controlando motores de passo. **Saber Eletrônica**, São Paulo, vol. 1(314), p. 48-53, 1999.

BUEHLER, M.; IAGNEMMA, K.; SING, S. **The DARPA Urban Challenge**. Berlin: Springer Tracts in Advanced Robotics, 2009. 623p.

BUENO, S.S., et al., Uma Plataforma para Pesquisa e Desenvolvimento em Robótica Terrestre de Exterior. In: IX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE (SBAI-2009), Brasília, DF, Brasil, 2009.

CADU-UFMG, 2010, <http://www.youtube.com/watch?v=M4ZVRhNeKXU>

CHRISTENSEN, H.I.; KIRKEBY, N.O.; KRISTENSEN, S.; KNUDSEN, L. Model-driven vision for indoor navigation. **Robot. Auton. Syst.** Vol.12, p.199–207, 1994

CRAIG, R.; GRAVSETH, I.; EARHART, R.P.; BLADT, J.; BARNHILL, S.; RUPPERT, L.; CENTAMORE, C. Processing 3D flash LADAR point-clouds in real-time for flight applications. In: THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING, 2007. **Proceedings of 2007 SPIE**, v. 6555 65550D-1. Sensors and Systems for Space Applications. DOI: 10.1117/12.720143.

DAHLKAMP, H., et al., Self-Supervised Monocular Road Detection in Desert Terrain. In: PROCEEDINGS OF THE ROBOTICS SCIENCE AND SYSTEMS CONFERENCE, 2006. DE PAIVA et. al., Controle de Trajetória para Veículos Terrestres de Exterior. In: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, CBA-2010, Bonito, MS, 2010.

DESOUSA, G.N.; KAK, A.C. Vision for mobile robot navigation: a survey. **IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intel.** Vol. 24(2), p. 237–267, 2002

DICKE, E.; CLIFF, D.; LAYZELL, P. Proceedings of Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology. In: FIRST INTERNATIONAL WORKSHOP, BIOADIT, 2004, LNCS 3141. p. 364-379.

DIOSI, Albert; TAYLOR, Goeffrey; KLEEMAN, Lindsay. Interactive SLAM using laser and advanced sonar. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2005. Barcelona, Spain. **Proceedings of 2005 ICRA**, p. 1103-1108.

FULGENZI, Chiara; SPALANZANI, Anne; LAUGIER, Christian. Dynamic obstacle avoidance in uncertain environment combining PVOs and occupancy grid. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2007. Roma, Italy. **Proceedings of 2007 ICRA**, p. 1610-1616.

GARTCHORE, R.; AGUADO, A.; GALAMBOS, C. Incremental map building using na occupancy grid for na autonomous monocular robot. In: 7<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL, AUTOMATION, ROBOTICS AND VISION (ICARCV'02), 2002. Singapura. **Proceedings of 2002 ICARCV**, p. 613-618.

GIETELINK, O.; PLOEG, J.; DE SCHUTTER, B.; VERHAEGEN, M. Development of advanced driver assistance systems with vehicle hardware-in-the-loop simulations. **Vehicle System Dynamics**, vol. 44(7), p. 569–590, 2006.

GRABOWSKI, R.; NAVARRO-SERMENT, L.E.; PAREDIS, C.J.J.; KHOSLA, P.K. Heterogeneous teams of modular robots for mapping and exploration. **Autonomous Robots**, v.8, n.3, p. 293-308, 2000.

GRINSTEAD, B. Vehicle-borne scanning for detailed 3D terrain model generation. SEA Commercial Vehicle Congress, 2005. SAE Technical Paper, Chicago, 2005-01-3557.

GUIVANT, J.; NIETO, J.; MASSON, F.; NEBOT, E. Navigation and mapping in large unstructured environments. **The Journal od Robotics Research**, v.2, p.. 449-471. DOI: 10.1177/0278364904042203 (2004).

GUTMANN, Jens-Steffen; FUKUCHI, Masaki; FUJITA, Masahiro. A floor and obstacle height map for 3D navigation of humanoid robot. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (IEEE/2005), 2005, Barcelona, Spain. **Proceedings of 2005 ICRA**, p. 1066-1071.

HASHIMA, M., HASEGAWA, F., KANDA, S., MARUYAMA, T., UCHIYAMA, T. Localization and obstacle detection for a robot for carrying food trays. In: PROCEDDINGS OF IEEE INT'L CONF. ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS (IROS), 1997. p. 345–351

HIMMELSBACH, M.; LUETTEL, T.; WUENSCHE, H.-J. Real-time object classification in 3D point clouds using point features histograms. In: IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, IROS 2009. St. Louis, USA. **Proceedings of 2009 ICIRS**, p, 994-1000.

HIRANO, L. A. Trajetórias Caóticas Para o Problema da Exploração de Terrenos com Metas de Busca ou Vigilância Usando Robôs Móveis. Ouro Preto - MG: Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, 2006. 64 p. Monografia.

HOHNER ELETRÔNICA. Seleção de Produtos, encoder incremental serie 75. 2 p. (2009). Disponível em: <http://www.hohner.com.br/serie75.pdf> Acesso em: 10 Janeiro 2010.

HOSEINNEZHAD, Reza; MOSHIRI, Behzad; ASHARIF, Mohammad Reza. P2-40: Sensor fusion for ultrasonic and laser arrays in mobil robotics: a comparative study for Fuzzy, Dempster and Bayesian approach. In: INTERNATIONAL IEEE SENSORS, 2002. **Proceedings of IEEE Sensors**, v.1, n.2, p. 1682-1689.

HUNTER, G. et al., Development of a Commercial Laser Scanning Mobile Mapping System – StreetMapper, 2006 In: SECOND INTERNATIONAL WORKSHOP: THE FUTURE OF REMOTE SENSING, October 17-18, Antwerp, Belgium 2006.

IRU (International Road Transport Union). A Scientific Study “ETAC” European Truck Accident Causation, 19 p., Geneva - Switzerland 2007.

KABUKA, M., ARENAS, A.E.: Position verification of a mobile robot using standard pattern. Proc.IEEE Int'l Conf. Robot. Autom. (ICRA), 3(6), 505–516 (1987)

KANG, J-G; AN S-Y; CHOI, W-S; OH, S-Y. Recognition and path planning strategy for autonomous navigation in the elevator environment. International Journal of Control, Automation, and System, v.8, n.4, p.808-821. DOI 10.1007/s12555-010-0413-3 (2010).

KAWASAKI, H.; FURUKAWA, R. Dense 3d reconstruction method using coplanarities and metric constraints for line laser scanning. In: PROCEEDINGS OF THE 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON 3D DIGITAL IMAGING AND MODELING, Montreal, Quebec Canada, 2007.

LAMON, P. et al., The SmartTer for ELROB 2006 – a Vehicle for Fully Autonomous Navigation and Mapping in Outdoor Environments, 2006. Disponível em: <http://www.smart-team.ch/>, 2006.

LAMON, P.; SIEGWART, R. 3D Position Tracking in Challenging Terrain. In: PROCEEDING OF THE FIELD AND SERVICE ROBOTICS, FSR, August, 2005.

LANEURIT, J.; BLANC, C.; CHAPUIS, R.; TRASSOUDAINE, L. Multisensorial data fusion for global vehicle and obstacles absolute positioning. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE INTELLIGENT VEHICLES SYMPOSIUM, p.138-143, 2003

LEE, Min-Gu; BAEG, Seung-Ho; LEE, Ki-Min; LEE, Hae-Seok; BEAG, Moon-Hong; PARK, Jong-Ok; KIM, Hong-Ki. Compact 3D LIDAR based on optically coupled horizontal and vertical scanning mechanism for the autonomous navigation of robots. In: THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING, 2011. **Proceedings of 2011 SPIE**, v.8037 80371H-1. Laser Radar Technology and Applications XVI. DOI: 10.1117/12.884476.

LEE, Sang-Mook; LEE, Bo-Hee; LEONESSA, Alexander; KURDILA, Andrew. A real-time grip map generation and object classification for ground-based 3D LIDAR data using image analysis techniques. In: 17<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE PROCESSING, 2010, Hong Kong, China. **Proceedings of 2010 ICIP**, p. 2253-2256.

LEVINSON, J.; THRUN, S. Robust Vehicle Localization in Urban Environments Using Probabilistic Maps. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA 2010), Anchorage Convention District, May 3-8, 2010.

MATSUMOTO, Y.; IKEDA, K.; INABA, M.; INOUE, H. Visual navigation using omnidirectional view sequence. In: PROCEEDINGS OF IEEE INT'L CONF. ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS (IROS), p. 317–322, 1999

MATSUMOTO, Y.; INABA, M.; INOUE, H. Visual navigation using view sequenced route representation. In: PROCEEDINGS OF IEEE INT'L CONF. ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA), vol. 1, p. 83–88, 1996

MATTERN, N.; SCHUBERT, R.; WANIELIK, G. High-accurate vehicle localization using digital maps and coherency images. In: IEEE INTELLIGENT VEHICLES SYMPOSIUM, University of California, San Diego, CA, USA, 2010.

MATTHIES, L.; SHAFER, S. A. Error modeling in stereo navigation. **IEEE J. Robot. Autom.** 3(3), p.239–248, 1987.

MAX PLANCK INSTITUTE FOR CHEMICAL ECOLOGY. Smelling scenery in stereo: Desert ants perceive odor maps in navigation. In Science Daily. Disponível em: <<http://www.sciencedaily.com/releases/2010/03/100309102527.htm>>. Acesso em 1 de maio. 2010.

McCALL, J. C.; TRIVEDI, M. M. Video-Based Lane Estimation and Tracking for Driver Assistance: Survey, System, and Evaluation, **IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS**, vol. 7(1), 2006.

MEIRELLES, Pablo. S.; ALVAREZ-JÁCOBO, Justo. E. Desenvolvimento de um Robô Autônomo Móvel. In: II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA - CONEM 2002, p. 1-9.

MENG, M.; KAK, A.C. Mobile robot navigation using neural networks and non metrical environment models. In: PROCEEDINGS OF IEEE CONTROL SYSTEMS, p 30–39, 1993

MENG, M.; KAK, A.C. NEURO-NAV: a neural network based architecture for vision-guided mobile robot navigation using non-metrical models of the environment. In: PROCEEDINGS OF IEEE INT L CONF. ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA), vol. 2, p 750–757, 1993

MICHEL, Philipp; CHESTNUTT, Joel; KAGAMI, Satoshi; NISHIWAKI, Koichi; KUFFNER, James; KANADE, Takeo. Online environment reconstruction for biped navigation. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2006. Orlando, Flórida, USA. **Proceedings of 2006 ICRA**, p. 3089-3094.

MIRANDA NETO, A. **Embedded Visual Perception System applied to Safe Navigation of Vehicles**, Tese (Doutorado), UNICAMP-Brasil e UTC-França, 2011.

MIRANDA NETO, A. Sistema Híbrido de Controle baseado na Percepção Multisensor aplicado à Navegação Segura de Veículos Terrestres Autônomos, Projeto de Pesquisa do Programa Ciências Sem Fronteiras, Chamada de Projetos MEC/MCTI/CAPES/CNPQ/FAPS Nº 60/2011.

MIRANDA NETO, A.; ZAMPIERI, D. E. Sistema de Navegação Semi-Autônomo de Assistência ao Condutor (SAC), Artigo Pré-projeto Pro-Defesa CAPES, 2008.

MORAS, Julien; RODRÍGUEZ, F. Sergio A.; DREVELLE, Vincent; DHERBOMEZ, Gérald; CHERFAOUI, Véronique; BONNIFAIT, Philippe. In: IEEE INTELLIGENT VEHICLES SYMPOSIUM, 2012. Alcalá de Henares, Spain. **Proceedings of 2012 IVS**, p. 778-783.

MORAVEC, H. P. The Stanford cart and the CMU rover. In: PROCEEDINGS OF IEEE, vol. 71, p.872–884, 1983

MORRIS, Willian; DRYANOVSKI, Ivan; XIAO, Jizhong. CityFlyer: Progress toward autonomous MAV navigations and 3D mapping. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2011. Shanghai, China. **Proceedings of 2011 ICRA**, p. 2972-2973.

MULHER, M.; WEHNER, R. Path integration in desert ants, *Cataglyphis fortis*. **Proc. Nati. Acad. Sci. USA**, Vol. 85, p. 5287-5290, 1988.

NEPAL, Kumud; FINE, Adam; IMAM, Nabil; PIETROCOLA, David; ROBERTSON, Neil; AHLGREN, David J. Combining a modified vector field histogram algorithm and real-time image processing for unknown environment navigation. In: INTELIGENT ROBOTS AND COMPUTER VISION, XXVI: ALGORITHMS AND TECHNIQUES, 2009. **Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging, 2009**, v.7252. 72520G-1. DOI: 10.1117/12.80

NETTO, A. V.; SOARES, A. L.; SILVA, M. S.; OTOBONI, J. A.; STEFANI, M. A. In: Desenvolvimento de um medidor de distância a Laser para uso industrial, 2000. Disponível em: <http://www.ipen.br/biblioteca/cd/conem/2000/GC9624.pdf>, Acesso em: 20 setembro 2012.

NIEUWENHUISEN, Mathias; STÜCLER, Jörg; BEHNKE, Sven. Improving indoor navigation of autonomous robots by an explicit representation of doors. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2010. Anchorage, Alaska, USA. **Proceedings of 2010 ICRA**, p. 4895-4901.

NUCHTER, Andreas. 3D Robotic Mapping – The Simultaneous Localization and Mapping Problem with Six Degrees of Freedom. In: CHENNAI/INDIA: SPRINGER TRACTS IN ADVANCED ROBOTICS, vol. 52, 2009, p.219.

OCHOA-DIAZ, Claudia Patricia. Estratégia de Mapeamento em 2D de ambientes internos baseada na extração de segmentos de linhas usando sensores de ultrasom. 2010. 75p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília.

OLIVEIRA ASSFALK, Marco Antonio. Aplicação de Métodos de Computação Flexível em navegação Autônoma de Veículos. 1995. 131p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

OTTE, M.W.; RICHARDSON, S.G.; MULLIGAN, J.; GRUDIC, G. Path Planning in Image Space for Autonomous Robot Navigation in Unstructured Environments. *Journal of Field Robotics*, v.26, n.2, p. 212-240, 2009. DOI: 10.1002/rob.20274.

OTTE, Michael W.; RICHARDSON, Scott G.; MILLIGAN, Jane; GRUDIC, Gregory. Local path planning in image space for autonomous robot navigation in unstructured environments. In: *IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON ONTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEM*, 2007. San Diego, CA, USA. **Proceedings of 2007 ICIRS**, p. 2819-1826.

PACHECO, Lluis; CUFI, Xavier; LUO, Ningsu; COBOS, Javier. WMR navigation using local potential field corridors and narrow local occupancy grid perception. **Proceedings of 2008 IEE** (2008).

PACHECO, Lluis; LUO Ningsu; CUFI, Xavier; COBOS, Javier. Local WMR navigation woth monocular data. In: *14<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTONOMOUS ROBOTS AND AGENTS*, 2009. Wellington, New Zeland. **Proceedings of 14<sup>th</sup> ICARA**, p. 584-589.

PAGAC, D.; NEBOT, E.M.; DURRANT-WHYTE, H. An evidential approach to map-building for autonomous vehicles. *Transactions on Robotics and Automation*, v.14, n.4, 1998.

PFAFF, P. Towards Mapping of Cities. In: *PROCEDDINGS OF THE IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA 2007)*, Rome, Italy, 2007.

QUANWEN, Zhu; LONG, Chen; QINGQUAN, Li; MING, Li; ANDREAS, Nüchter; JIAN, Wang. 3D LIDAR point cloud based intersection recognition for autonomous driving. In: *INTELLIGENT VEHICLES SYMPOSIUM, 2012*. **Proceedings of 2012 IVS**, p. 456-461.

QUECK, Boon Kiat; IBAÑEZ-GUZMÁN, Javier; LIM, Khiang Wee. Feature-based perception for autonomous unmanned navigation. **Proceedings of 2003 IEEE**, p. 1791-1796.

REMAZEILLES, A.; CHAUMETTE, F.; GROS, P. 3D navigation based on a visual memory. In: PROCEEDINGS OF IEEE INT'L CONF. ON ROBOTICS AND AUTOMATIONS (ICRA), p.2719–2725, 2006

REN, Hongliang; VASILYEV, Nickolay V.; DUPONT, Pierre E.; Detection of curved robots using 3D ultrasound. In: IEEEQRJS INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, 2011. San Francisco, CA. USA. **Proceedings of 2011 ICIRS**, p. 2083-2089.

RENAEST. Anuário Estatístico do Departamento Nacional de Transito DENATRAN -2006, www.denatran.gov.br - Portal RENAEST. 2006

RIAZ, Z.; PERVEZ, A.; AHMER, M.; IQBAL, J. A fully autonomous indoor mobile robot using SLAM. In: International Conference on Information and Emerging Technologies. **Proceedings of 2010 IEEE**, pp. 1-6

ROCHA, Rui; FERREIRA, Filipe; DIAS, Jorge. Multi-robot complete exploration using hill climbing and topological recovery. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008. Nice, France. **Proceedings of 2008 ICROS**, p. 1884-1889.

RODRÍGUEZ FLÓREZ, S. A. (2010). Contributions by Vision Systems to Multi-sensor Object Localization and Tracking for Intelligent Vehicles. University of Technology of Compiegne. Heudiasyc Laboratory, UMR UTC/CNRS 6599.

SCHNEIDER, Sebastian; HIMMELSBACH, Michael; LUETTEL, Thorsten; WUENSCHE, Hans-Joachim. Fusing vision and LIDAR – synchronization, correction and occlusion reasoning. In: IEEE INTELLIGENT VEHICLES SYMPOSIUM, 2010. **Proceedings of 2010, IVS**, p.388-393.

SCHNEIER, M.; CHANG, T.; HONG, T. SHACKLEFORD, W.; BOSTELMAN, R. ALBUS, J.S. Learning traversability models for autonomous mobile vehicles. Autonomous Robot, v.24, p.69-86. DOI: 101007/s10514-007-9063-6 (2008).

SHEH, Raymond; JAMALI, Nawid; KADOUS, M. Waleed; SAMMUT, Claude. A low-cost, compact, lightweight 3d range sensor. In: AUSTRALASIAN CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, ACRA 2006. **Proceedings of 2006 ACRA**.

SICILIANO, Alexandre de Vasconselos. **Determinação de trajetória ótima em navegação robótica móvel, utilizando algoritmo genético.** 2006. 95p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ - BRASIL.

SICK, LMS 200 / LMS211 / LMS 220 / LMS 221 / LMS 291 Laser Measurement Systems: Technical Description, Ninburger Satrabe, Germany, 2003. 40 p.

SIEGWART, R., NOURBAKHSH, I. **Introduction to Autonomous Mobile Robots.** The MIT Press, 2004.

SINGHAL, Amit; BROWN, Chris. Dynamic Bayes net approach to multimodal sensor fusion. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF OPTICAL ENGINEERING, 1997. **Proceedings of 1997 SPIE.**

SOLBET (2006), Microcontroladores e Robótica. Sb PowerStep: Manual do usuário - SbPowerboard, placa de desenvolvimento, Campinas, 2006. 37 p.

SOUZA, Anderson. A. S.; GONÇALVES Luiz. M. G. 2.5-Dimensional Grid Mapping from Stereo Vision for Robotic Navigation. In: 2012 BRAZILIAN ROBOTICS SYMPOSIUM AND LATIN AMERICAN ROBOTICS SYMPOSIUM, 2012 IEEE. p. 39-44.

SRINIVASAN, V.; LEHRER, M.; KIRCNER, W.H.; ZHANG, S.W. Range perception through apparent image speed in freely flying honeybees. **Vis. Neurosci.** Vol. 6 (5), p. 519–35, 1991

STECK, K.; HANSSON B. S.; KNADEN, M. Smells like home: Desert ants, Cataglyphis fortis, use olfactory landmarks to pinpoint the nest. **Frontiers in Zoology**, vol. 6 (5), 2009. Published: 27 February 2009, doi: 10.1186/1742-9994-6-5.

STECK, K.; KNADEN, M.; HANSSON B. S. Do desert ants smell the scenery in stereo?. **Animal Behaviour**, vol. 79(4), p. 939-945, 2010.

STEPÁN, Pert; PREUCIL, Libor; KULICH, Miroslav. Fusion of a color camera and rangefinder data by occupancy grids. **Proceedings of 2003 SPIE**, v.5083.

STILLER, Christoph; ZIEGLER, Julius. 3D perception and planning for self-driving and cooperative automobiles. In: 9<sup>th</sup> INTERNATIONAL MULTI-CONFERENCE ON SYSTEMS, SIGNALS AND DEVICES, 2012. **Proceedings of 2012 IMCSSD**.

STOYANOV, Todor. D. **Reliable Autonomous Navigation in Semi-Structured Environments using the Three-Dimensional Normal Distributions Transform (3D-NDT)**. 2012. 145p. Tese (Doutorado) – Computer Science, Orebro University, Sweden.

TALAYA, J. Integration of a terrestrial laser scanner with GPS/IMU. Orientation Sensors XXth ISPRS Congress, Istanbul, 2004.

TANG, Jimmy; ZAKHOR, Avideh. 3D object detection from roadside data using laser scanners. In: THE INTERNATIONAL SOCIETY OF OPTICAL ENGINEERING, 2011. **Proceedings of SPIE-IS&T Eletronic Imaging - Three-Dimensional Imaging, Interaction, and Measurement**, v.7864, 7864V-1. DOI: 10.1177/12.872620.

TEAM BERLIN (2007), “Spirit of Berlin: An Autonomous Car for the DARPA Urban Challenge Hardware and Software Architecture”. Disponível em <[http://www.darpa.mil/grandchallenge/TechPapers/Team\\_Berlin.pdf](http://www.darpa.mil/grandchallenge/TechPapers/Team_Berlin.pdf)>. Acesso em 1 de maio 2010.

TEAM OSHKOSH (2011). Terramax - Darpa Urban Challenge. Disponível em <[http://www.terramax.com/technology/the\\_brawn.cfm](http://www.terramax.com/technology/the_brawn.cfm)>. Acesso em 28 de maio de 2011.

THOMSON AIRPAX (1995). **Product Selection and engineering Guide: catálogo**. New York 1995. 41 p.

THORPE, C.; FIDO vision and navigation for a mobile robot. In: PhD dissertation, Dept Computer Science, Carnegie Mellon University (1983)

THRUN, S. et al., Stanley, the robot that won the DARPA Grand Challenge, **Journal of Robotic Systems**, v. 23 , i. 9, DARPA Grand Challenge, p. 661-692, 2006, ISSN:0741-2223.

THRUN, S., BURGARD, W., FOX, D.: **Probabilistic robotics**, edição MIT Press, Cambridge, Massachusetts 2005.

THRUN, S.: Probabilistic algorithms in robotics. Technical Report CMU-CS-00-126, Carnegie Mellon University (2000).

TRIPP, Jeffrey W.; ULITSKY, Ardky; PASHIN, Sergey; MAK, Nikolay; HAHN, John F. In: THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING, 2003. **Proceedings of 2003 SPIE**, v. 5088, p. 112-122.

VALE, Alberto M. Martinho. Mobile Robot Navigation in Outdoor Environments: A Topological Approach. 2005. 198p. Tese (Doutorado) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

VELAGIC, J.; LACEVIC, B.; PERUNICIC, B. A 3-level autonomous mobile robot navigation system designed by using reasoning/search approaches. *Robotics and Autonomous Systems*, v.54, p. 989-1004, 2006. DOI: 10.1016/j.robot.2006.05.006.

VELODYNE LIDAR INC, High Definition Lidar HDL-64E S2 (Brochure). 2 p. Disponível em: [http://velodynelidar.com/lidar/products/brochure/HDL-64E%20S2%20datasheet\\_2010\\_lowres.pdf](http://velodynelidar.com/lidar/products/brochure/HDL-64E%20S2%20datasheet_2010_lowres.pdf). Acesso em: 22 de junho de 2013.

WEISS, U.; BIBER, P. Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D LIDAR sensor. *Robotics and Autonomous Systems*, v. 59, n 5, p. 265-273, 2011.

WILLIS, Andrew R.; ZAPATA, Malcolm J.; CONRAD, James M. A linear method for calibrating LIDAR-and-camera systems. In: IEEE Computer Society's Annual International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems, MASCOTS, 2009. **Proceedings of 2009 MASCOTS**, p. 577-579.

WITTLINGER, M.; WEHNER, R.; WOLF, H. The desert ant odometer: a stride integrator that accounts for stride length and walking speed. *Journal of Experimental Biology*, vol. 210, p. 198-207, 2007.

WURM, K.M.; STACHNISS, C.; GRISETTI, G. Bridging the gap between feature- and grid-based SLAM. *Robotics and Autonomous System*, v.58, p. 140-148, 2010. DOI: 10.1016/j.robot.2009.09.009.

YAMAUCHI, Brian. Autonomous urban reconnaissance using man-portable UGVs. In: THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING, 2006. **Proceedings of 2006 SPIE**, v.6230 62300S-1. Unmanned Systems Technology VIII. DOI: 10.1117/12.660435.

YANG, Shao-Wen; WANG, Chieh-Chih. Feasibility grids for localization and mapping in crowded urban scenes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMOTATION, 2011. Shanghai, China. **Proceedings of 2011 ICRA**, p. 2322-2328.

ZHANG, A. et al., Fast Continuous 360 Degree Color 3D Laser Scanner. In: THE INTERNATIONAL ARCHIVES OF THE PHOTOGRAHAMTRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, Vol XXXVII, Part B1, Beijing, China, 2008.

ZHOU, Hongjun; SAKANE, Shigeyuki. Localizing objects during robot SLAM in semi-dynamic environments. In: IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2008. Xian, China. **Proceedings of the 2008 IEEE/ASME**, p 595-601.

## **ANEXO A - Módulo “Sb Power Step”**

Uma placa da SOLBET foi escolhida para este trabalho devido à necessidade de aprimorar o controle dos motores de passo, e fazer com que eles pudessem ser utilizados em rotinas contínuas de deslocamento de uma determinada quantidade de pulso para depois parar e esperar a realização da medida do laser.

Esta placa permite o controle remoto, via interface serial, de até dois motores de passo do tipo unipolar, com cinco ou seis fios. A tensão de alimentação pode variar de 8 a 15 V, e favorece o controle da velocidade e da direção de giro dos dois motores de passo por meio de um computador. Caso a tensão do motor venha a ser diferente da tensão de alimentação da placa, ela poderá variar de 5 a 60 V (SOLBET, 2006).

- ***Características do controlador***

Este módulo possui as seguintes características básicas:

1. Controla dois motores de passo de quatro bobinas cada um, com voltagem máxima de 12V e corrente máxima de 500 mA por bobina;
2. Alimentação de 8 a 15 V;
3. Alimentação separada para o motor, caso seja necessário;
4. Comunicação serial RS232-C, 9600, 8, N, 1 (9600 *bauds*, 8 bits de dados, sem paridade e 1 *Stop Bit*);
5. Protocolo de comunicação com comandos para controle individual dos motores e teste de conexão;
6. Pode ser ligado em rede 485, permitindo a elaboração de estrutura de até 64 motores de passo. Comandos em ASCII permitem o endereçamento individual ou simultâneo dos motores. É necessário o conversor físico RS232/RS485 para o acoplamento com este tipo de rede.

Tabela A.1 - Comandos usados pelo módulo *Sb Power Step* para o controle dos motores.

Comando	Parâmetro	Ação
<b>A</b>	NNN qualquer valor entre 1 e 32767	Estabelece a duração do passo do motor 0, cada unidade equivale 0.1 ms de duração do passo
<b>B</b>	NNN qualquer valor entre 1 e 32767	Estabelece a duração do passo do motor 1, cada unidade equivale 0.1 ms de duração do passo
<b>C</b>	Nenhum	Liga ambos os motores
<b>D</b>	Nenhum	Desliga ambos os motores
<b>E</b>	Nenhum	Motor ZERO no sentido horário
<b>F</b>	Nenhum	Motor ZERO no sentido anti-horário (default)
<b>G</b>	Nenhum	Motor UM no sentido horário
<b>H</b>	Nenhum	Motor UM no sentido anti-horário (default)
<b>I</b>	Nenhum	Solicita o endereço atual do modulo
<b>J</b>	Nenhum	Solicita identificação do firmware
<b>K</b>	0 ou 1	Desliga motor ZERO ou UM
<b>L</b>	0 ou 1	Liga motor ZERO ou UM
<b>N</b>	Nenhum	Motor ZERO no modo livre
<b>O</b>	Nenhum	Motor ZERO no modo de contagem de passos
<b>P</b>	Nenhum	Motor UM no modo livre
<b>Q</b>	Nenhum	Motor UM no modo de contagem de passos
<b>R</b>	NNN qualquer valor entre 1 e 2 <sup>31</sup>	Estabelece o número de passos do motor ZERO
<b>S</b>	NNN qualquer valor entre 1 e 2 <sup>31</sup>	Estabelece o número de passos do motor UM
<b>T</b>	0 ou 1	Seleciona o modo <i>full step</i> : se o segundo parâmetro é 0, <i>full step</i> no motor ZERO, se é 1 <i>full step</i> no motor UM
<b>U</b>	0 ou 1	Seleciona o modo <i>half step</i> do motor selecionado
<b>V</b>	NNN entre 0 e 255	Ativa a recepção de comandos do módulo de endereço NNN
<b>W</b>	Nenhum	Desativa recepção de comandos de todos os módulos
<b>X</b>	NNN entre 0 e 255	Estabelece o endereço do módulo
<b>Z</b>	0 ou 1 seguido de NNN (0 A 255)	Estabelece o tempo máximo que uma bobina é acionada. Cada unidade equivale a 1 ms de tempo alto

A Tabela A.1 apresenta os comandos usados no protocolo de comunicação para o controle dos motores de passo. Estes são reconhecidos após o recebimento de um carácter <CR>, ENTER se estiver utilizando o teclado, ou 0x0D se estiver utilizando comandos via programa.

A placa selecionada permite a utilização do motor de passo por pulsos enviados, tendo assim melhor controle e podendo enviar somente o número de passos (ou meio passos) necessários a uma determinada posição.

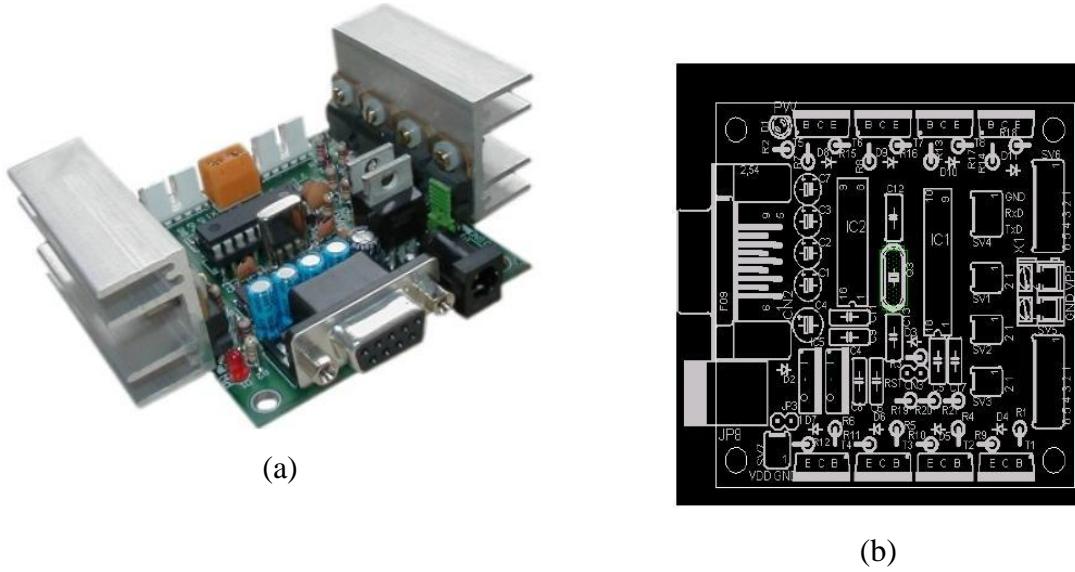


Figura A.1 - Vista do módulo *Sb Power Step* para controlar motores de passo, (a) placa terminada, (b) disposição dos componentes.

## **ANEXO B - Módulo para desenvolvimento “Sb Powerboard”**

O módulo *Sb Powerboard* é uma placa especialmente projetada para o desenvolvimento de sistemas dedicados, baseados no microcontrolador PIC. O sistema atende aos requisitos de desenvolvimento de projetos robóticos, de controle, de aquisição de dados e outros vários dispositivos. Apresenta uma grande quantidade de periféricos prontos para serem utilizados, e é ideal para controle em “tempo real” (SOLBET, 2006), principal razão pela qual foi escolhida para leitura dos dados enviados pelo *encoder* no momento da leitura da posição do *scanner* a laser LMS-291.

Esta placa foi projetada para ser versátil, podendo-se configurar de diferentes formas e assim, otimizar sua aplicação. Pode ser empregada como protótipo funcional, ideal para pequenas séries em que não seja preciso se preocupar com o desenvolvimento de hardware. A versatilidade será utilizada em diversas configurações para melhorar o sistema da Plataforma Posicionadora.

O uso de programadores (gravadores) externos a fim de agilizar o ciclo de desenvolvimento é dispensável, visto que dispõe de um carregador de programas embutido no chip, que segue junto com a placa. O código hexa desenvolvido pode ser transferido para a placa pelo programa *SbMaster* (disponibilizado pela Empresa Solbet), disponível para sistemas operacionais Windows e Linux.

Todos os softwares para a simulação e programação da placa (em específico do microcontrolador PIC) podem ser encontrados na internet, sendo a maioria deles gratuitos. A utilização de um gravador externo para o processo de gravação do *firmware* no microcontrolador PIC da placa é fácil e de custo acessível.

A placa *Sb Powerboard* possui três versões, sendo que a alteração de uma versão para outra superior consiste na inserção de componentes adicionais fornecendo mais recursos. A versão

*Powerboard Lite*, mais econômica, foi a selecionada (Figura B.1). Ela contém um CPU PIC16F877A e interface serial RS232, e disponibiliza todas as portas do PIC.

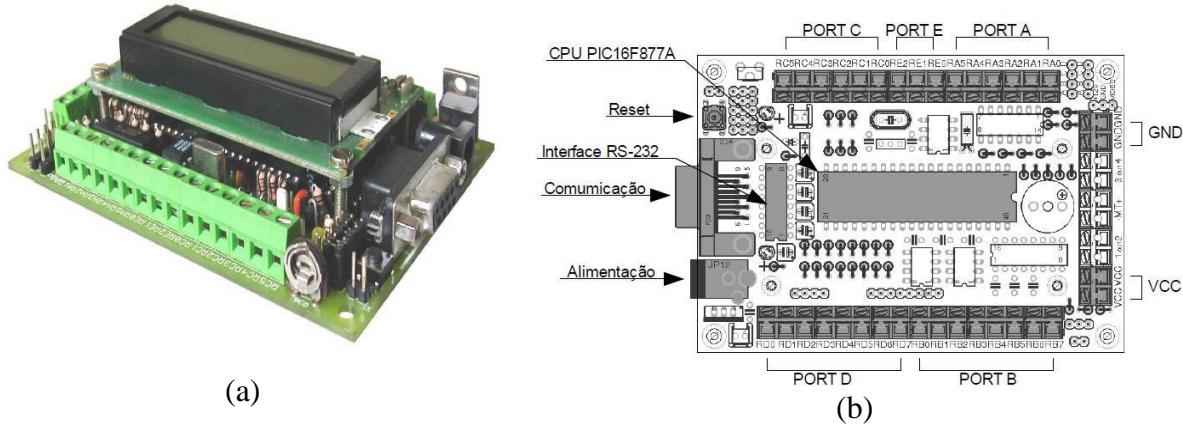


Figura B.1 - Vista do módulo experimental *Sb Powerboard*, (a) placa terminada na versão completa, (b) configuração da placa na versão *Sb Powerboard Lite*.

- **Especificações do Sb Powerboard**

A seguir relacionados os periféricos disponíveis na versão *Sb Powerboard Lite*:

- Comunicação serial RS 232
- Entrada digital até 31 entradas
- Saídas digitais até 31 saídas.
- Contadores: 1 a 8 bits e 2 de 16 bits.
- Conversores A/D: até 8 com resolução de 8 bits
- Saídas PWM: 2 de 10 bits de resolução

O microcontrolador é um CPU RISC PIC16F877A, 10 MHz, com os seguintes periféricos internos:

- Memória de programa de 8Kx14 palavras
- Memória RAM de dados de 368x8 bytes
- Memória EEPROM de dados de 256x8 bytes

- Dois temporizadores 8 bits
- Um temporizador 16 bits
- Dois módulos de captura (16 bits), comparação (16 bits) e PWM (10 bits)
- Modo *sleep*
- Porta serial RS232C
- Porta paralela escrava 8 bits
- Detector de *brownout*
- Dois comparadores analógicos
- Tensão de referência interna
- Oito entradas analógicas 10 bits resolução
- Trinta e três pinos de E/S digital

As características de alimentação da placa são:

- Alimentação: 8 a 15VDC - Corrente depende dos periféricos adicionados. Quanto maior a tensão de alimentação, maior será a dissipação de calor no regulador de tensão, portanto é normal o aquecimento do componente.
- Corrente máxima de consumo 500 mA. O regulador de tensão tem capacidade de fornecer até 1 A de corrente, caso utilize periféricos externos com um total de até 500 mA alimentados pelo conector VCC (saída do regulador), deve-se utilizar uma fonte com 1A de carga, para suprir o consumo dos periféricos adicionais.
- Conector JP12, padrão J4, conforme polarização (positivo o borde exterior do conector, negativa a ponta colocada internamente no conector)
- As portas de entrada e saída do *Sb Powerboard* podem ser totalmente configuráveis pelo usuário, todas as conexões possuem um resistor “*pull-up*” de 10 Komhs. As portas estão claramente identificadas na placa, existindo PORTAS A, B, C, D, E (Figura B.2).

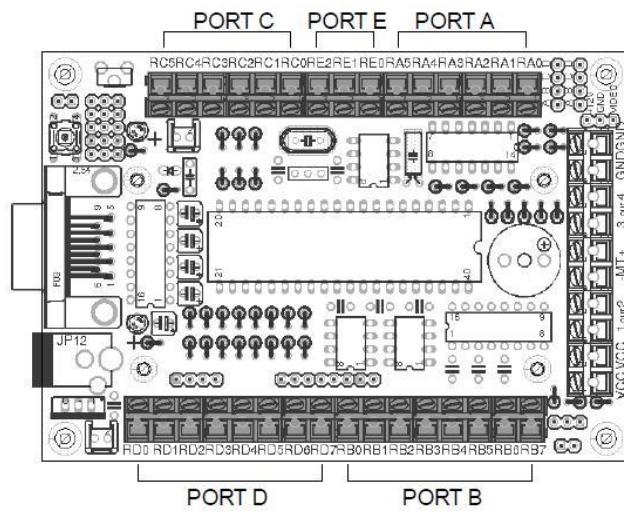


Figura B.2 - Vista das portas do módulo experimental *Sb Powerboard Lite*.

## **ANEXO C - Motor de Passo**

O motor de passo é um dispositivo usado para converter pulsos elétricos em movimento mecânico rotacional discreto segundo o catálogo do Thomson Airpax (1995).

Em linhas gerais, o motor de passo é um atuador do tipo digital. Na operação mais típica, a cada pulso recebido da unidade de controle, as correntes em suas fases são chaveadas e o rotor do motor avança ou recua um passo. Eles exibem três estágios: parados, ativados com o rotor travado (bobinas energizadas) ou girando em etapas.

No que se refere ao seu funcionamento, os motores de passo podem ser comparados aos síncronos, ou seja, um campo rotativo (neste caso gerado pela eletrônica de controle) faz girar um rotor magnético, Figura C.1. Tais motores foram subdivididos de acordo com a forma de geração do campo rotativo (enrolamento bipolar ou unipolar no estator) e do material empregado na confecção do rotor. Os mais usados são os unipolares, geralmente de quatro bobinas. Neles, cada fase consiste de um enrolamento com derivação central, ou mesmos de dois enrolamentos separados, de forma que o campo magnético possa ser invertido sem a necessidade de se inverter o sentido da corrente.

Os motores de passo possuem algumas características próprias que os diferencia dos motores comuns (BRAGA, 1999):

- Os motores de passo funcionam como dispositivos posicionadores, pois podem parar em uma posição perfeitamente controlada.
- Os motores de passo também funcionam como motores de velocidade perfeitamente controlada, sendo energizados em uma determinada ordem.
- Eles podem ter o seu eixo posicionado em um ângulo proporcional ao número de impulsos na entrada.

- Os erros que ocorrem no posicionamento de seu eixo são bem pequenos e não são acumulativos. Um motor de passo pode ser posicionado com a precisão de 1 milésimo de radiano.
- O controle sem realimentação (*open loop*) é possível devido ao uso de sinais digitais para esta finalidade.
- As respostas à partida, à parada e à reversão são muito rápidas.

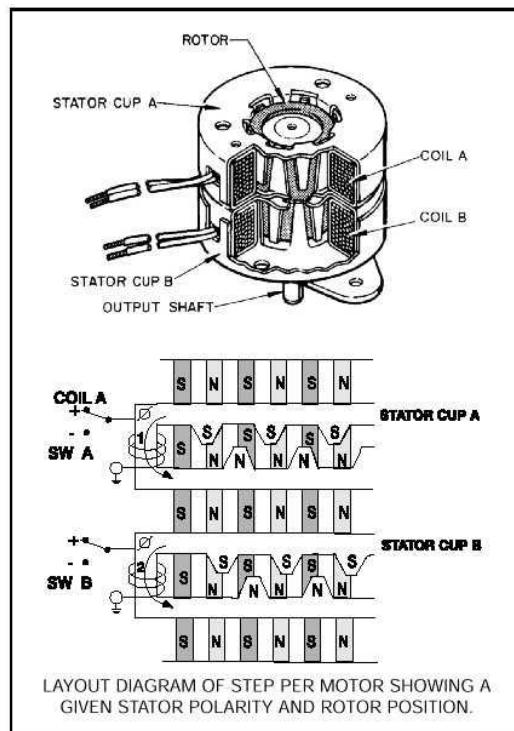


Figura C.1 - Motor de passo magnético permanente em detalhe.

O ângulo do passo do motor é variável (de  $0.72^\circ$  até  $90^\circ$ ), alguns ângulos de passo padronizados são:  $3.6^\circ$  (100 ppv),  $7.5^\circ$  (48 ppv),  $15^\circ$  (24 ppv),  $18^\circ$  (20 ppv).

O torque produzido por um motor de passo específico depende de vários fatores: duração do passo, corrente aplicada ao enrolamento e o projeto do “drive” ou módulo controlador.

A curva característica Torque-Velocidade do motor de passo é a chave para a seleção correta do tipo de motor e o melhor método de controle. Na Figura C2 observa-se a curva característica dos motores de passo da série SM1.8 – NEMA 17 da Action Techology (2009).

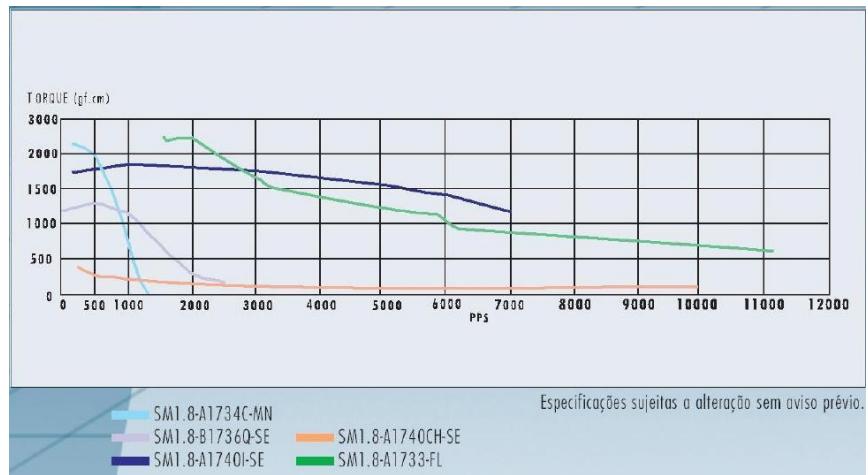


Figura C.2 - Curva característica Torque/Velocidade dos motores de passo da série SM1.8 – NEMA 17.

O motor SM1.8-A1736Q-SE mostrado na Figura C.3, foi selecionado para ser o acionador da plataforma posicionadora. Funciona a 12 V, é de fácil controle devido a ser unipolar, com torque suficiente se adaptará facilmente ao Módulo *Sb PowerStep*.

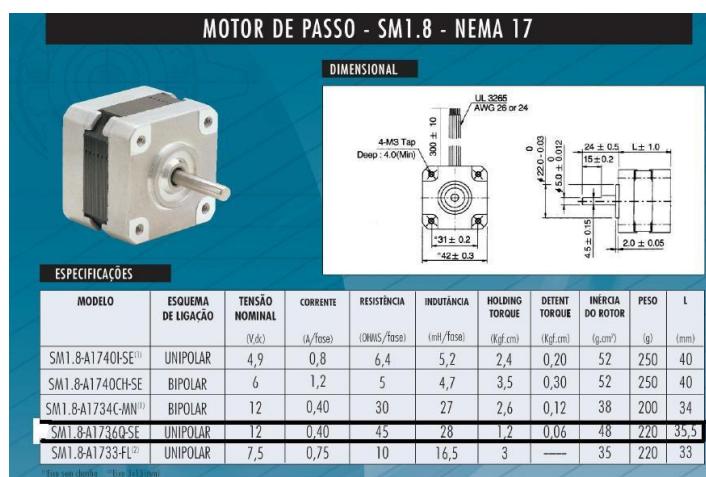


Figura C.3 - Seleção do motor SM1.8-A1736Q-SE da serie NEMA 17.

As principais características do motor selecionado são: alimentação de 12V, corrente de 0.40A/fase, ângulo de passo de 1.8, de 2 fases, 200 ppv, temperatura suportada varia de 10 a 50°C. Na figura C.4, observam-se os modos de ligação unipolar e bipolar e o esquema da seqüência de ligação dos motores de passo unipolares e bipolares (ALVAREZ, 2001).

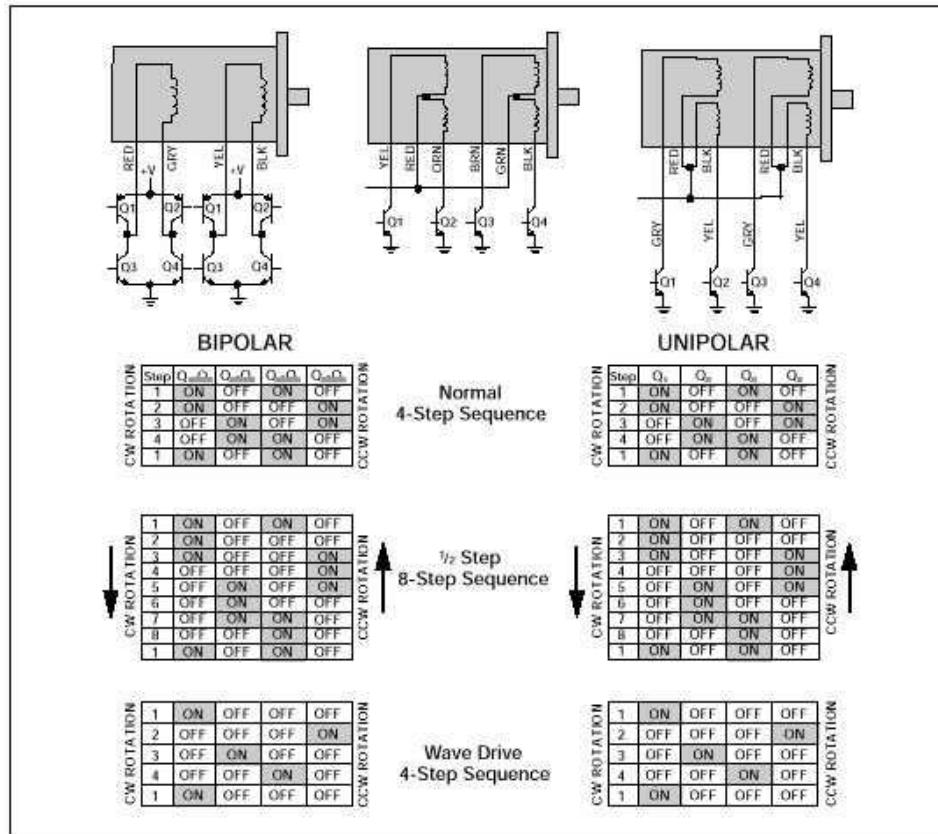


Figura C.4 - Esquema da seqüência de ligação de motores de passo unipolares e bipolares.

## **ANEXO D - *Encoder***

*Encoders* ou geradores de Impulsos são dispositivos eletromecânicos, utilizados para conversão de movimentos rotativos ou deslocamentos lineares em impulsos elétricos de onda quadrada, que geram uma quantidade exata de impulsos por volta em uma distribuição perfeita dos pulsos ao longo dos 360 graus do giro do eixo. Podem ser definidos também como transdutores de posição angular/linear. Podem ser utilizados em conjunto com contadores, tacômetros, controladores lógicos programáveis ou conversores de freqüência para sinais analógicos. Fornecem medidas e controles precisos em velocidades de rotação, velocidades lineares, posicionamentos angulares, volumes ou vazões de produtos líquidos, robótica e outras aplicações em processos diversos.

O sistema de leitura é baseado em um disco (*encoder* rotativo) formado por janelas radiais transparentes e opacas alternadas. Este é iluminado perpendicularmente por uma fonte de luz infravermelha, quando então, as imagens das janelas transparentes são projetadas no receptor. O receptor converte essas janelas de luz em pulsos elétricos conforme os desenhos da Figura D.1 (HIRANO, 2006). Existem dois tipos de *encoder*: incremental e absoluto.

O *encoder* incremental fornece normalmente dois pulsos quadrados defasados em 90°, que são chamados usualmente de canal A e canal B. A leitura de somente um canal fornece apenas a velocidade, enquanto que a leitura dos dois canais fornece também o sentido do movimento. Outro sinal, chamado de Z ou zero também está disponível e ele dá a posição absoluta "zero" do *encoder*. Este sinal é um pulso quadrado em que a fase e a largura são as mesmas do canal A. A resolução do *encoder* incremental é dada por pulsos/revolução (normalmente chamado de PPR), isto é, o *encoder* gera certa quantidade de pulsos elétricos por uma revolução dele próprio (no caso de um *encoder* rotativo). Para determinar a resolução basta dividir o número de pulsos por 360°, por exemplo, um *encoder* fornecendo 1024 pulsos/ revolução, geraria um pulso elétrico a cada 0,35° mecânicos. A precisão do *encoder* incremental depende de fatores mecânicos, elétricos e ambientais, que são: erros na escala das janelas do disco, excentricidade do disco,

excentricidade das janelas, erro introduzido na leitura eletrônica dos sinais, temperatura de operação e nos próprios componentes transmissores e receptores de luz.

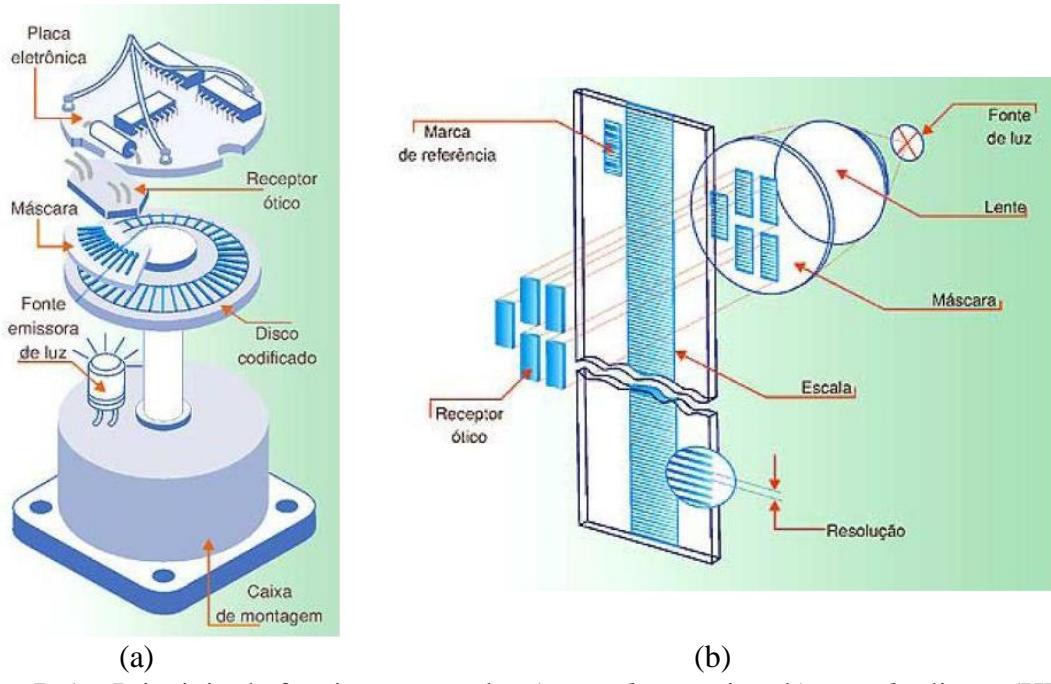


Figura D.1 – Princípio de funcionamento de: a) *encoder* rotativo, b) *encoder* linear (HIRANO, 2006).

O princípio de funcionamento de um *encoder* absoluto e de um *encoder* incremental é bastante similar, isto é, ambos utilizam o princípio das janelas transparentes e opacas, com estas interrompendo um feixe de luz e transformando pulsos luminosos em pulsos elétricos. O *encoder* absoluto possui um importante diferencial em relação ao *encoder* incremental: a posição do *encoder* incremental é dada por pulsos a partir do pulso zero, enquanto a posição do *encoder* absoluto é determinada pela leitura de um código e este é único para cada posição do seu curso. Conseqüentemente, os *encoders* absolutos não perdem a real posição no caso de uma eventual queda da tensão de alimentação (até mesmo se deslocados). Quando voltar a energia ao sistema, a posição é atualizada e disponibilizada para o mesmo (graças ao código gravado no disco do *encoder*) e, com isso, não se precisa ir até a posição zero do *encoder* para saber a sua localização como é o caso do incremental. O código de saída é utilizado para definir a posição absoluta do *encoder*.

O *encoder* selecionado para o projeto da plataforma posicionadora foi um incremental da marca Hohner tipo 7514-0682-2500, mostrado na Figura D.2, pela relação custo benefício, quando comparado a um *encoder* absoluto que teria sido mais preciso.

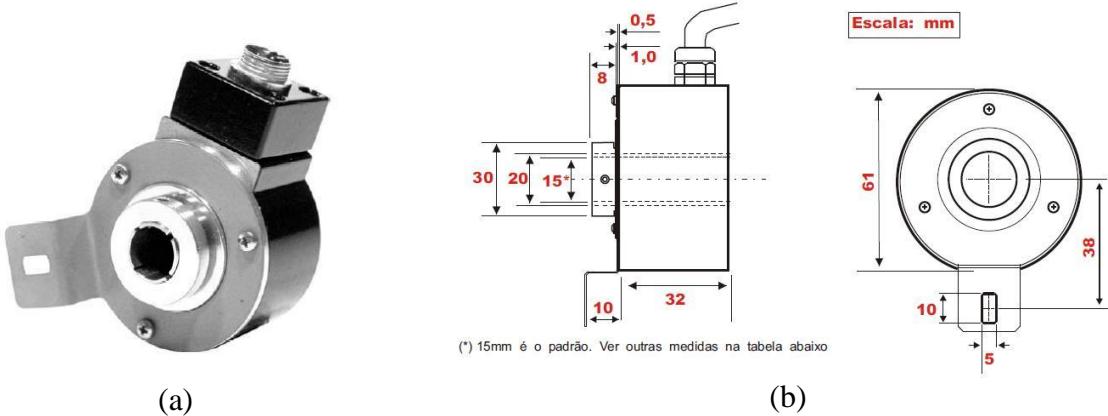


Figura D.2 - *Encoder* Incremental Hohner da série 75; (a) vista do *encoder*, (b) desenho e medidas técnicas do *encoder* vazado.

- ***Características Mecânicas e Elétricas do Encoder***

O *encoder* utilizado para a Plataforma Posicionadora é o HOHNER modelo 7514-0682-2500. Na Figura D.3, será especificado resumidamente o que significa cada número na série do *encoder*: “75” do tipo 75; “14” com um diâmetro de eixo 14; “6” com 6 canais (A, B, 0, A/, B/, 0/); “8” conector de 8 pinos (MIC8); “2500” são o número de pulsos por volta. Na Figura D.3 é apresentada a ligação do *encoder* com os sinais gerados em cada saída.

Nas Tabelas D.1 e D.2 são apresentadas as principais características mecânicas e elétricas do *encoder* Hohner da série 75.

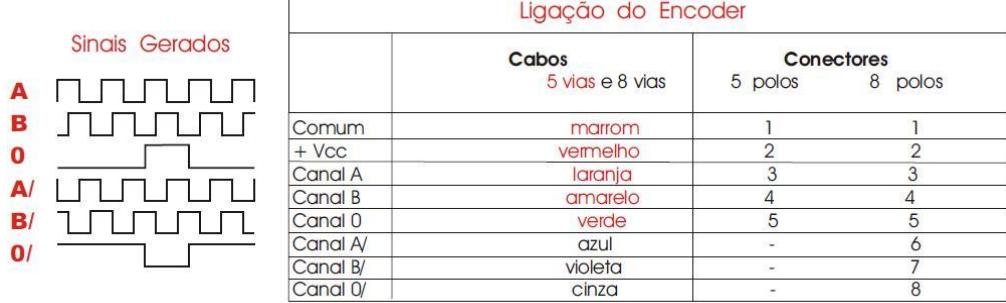


Figura D.3 - Sinais gerados e detalhes da ligação das saídas do *Encoder Incremental*  
Hohner da série 75

Tabela D.1 - Características Mecânicas do *encoder* incremental Hohner série 75 (HOHNER ELETRÔNICA, 2009).

Característica	Tipo
<b>Base</b>	<b>Alumínio</b>
<b>Tampa</b>	<b>Zamak</b>
<b>Eixo Vazado (15 mm)</b>	<b>Aço inox</b>
<b>Rolamentos</b>	<b>6804ZZ</b>
<b>Peso</b>	<b>0,4 Kg</b>
<b>Grau de proteção (padrão)</b>	<b>IP54</b>
<b>Rotação Máxima</b>	<b>3000 rpm</b>
<b>Carga radial máxima</b>	<b>10 KG</b>
<b>Carga radial mínima</b>	<b>10 KG</b>

Tabela D.2 - Características elétricas do *encoder* incremental Hohner série 75 (HOHNER ELETRÔNICA, 2009).

Característica	Tipo
<b>Alimentação</b>	<b>5 a 38 Vdc</b>
<b>Corrente total máxima</b>	<b>80mA</b>
<b>Corrente máxima por saída</b>	<b>20 mA</b>
<b>Frequência máxima</b>	<b>100 kHz</b>
<b>Temperatura de operação</b>	<b>-10 a +80 °C</b>
<b>Pulsos por giro</b>	<b>Até 2500</b>

## ANEXO E - Programas em MATLAB

**E.1- Programa “scanlms.m”:** Executa as funções de comandos para o Módulo Posicionador e para o sensor SICK LMS, a partir do MATLAB (em S.O. LINUX e com *Toolbox* SICK), recebendo e armazenado os dados numa matriz [X Y Z].

```
%=====
% Use: [X Y Z] = scanlms
%-----
% AUTORES: Nilson Pereira e Justo E. Alvarez
%   PIC conectado pela porta serial COM1 %ttyS0
%   SICK conectado pela porta serial COM3 %ttyS2
%   mudando para ttys1 --> ttyS0
%=====

function [X Y Z]=scanlms()

X = 0;
Y = 0;
Z = 0;

done=1;
while done
    horz_angle = input('Angulo total de scaneamento horizontal (entre 10 e
360): \n');
if horz_angle == 0
fprintf('\n** Escaneamento cancelado **\n\n')
return
end
if (horz_angle < 10 || horz_angle > 360)
fprintf('\n** Valor invalido. Entre "0" para cancelar. **\n\n')
else
    done=0;
end
end

done=1;
while done
    horz_res = input('Resolucao horizontal (Entre 0.5 e 10): \n');
if horz_res == 0
fprintf('\n** Escaneamento cancelado **\n\n')
return
end
if (horz_res < 0.25 || horz_res > 10)
fprintf('\n** Valor invalido. Entre "0" para cancelar. **\n\n')
else
    horz_res = horz_res*10;
    done = 0;
```

```

end
end

done=1;
while done
    vert_angle = input('Angulo total de scaneamento vertical (100 ou 180):
    \n');
if vert_angle == 0
    fprintf('\n** Escaneamento cancelado **\n\n')
return
end
if (vert_angle == 90 || vert_angle == 100 || vert_angle == 180)
done = 0;
else
    fprintf('\n** Valor invalido. Entre "0" para cancelar. **\n\n')
end
end

done=1;
while done
    vert_res = input('Resolucao vertical (0.25, 0.5 ou 1.0): \n');
if vert_res == 0
fprintf('\n** Escaneamento cancelado **\n\n')
return
end
if (vert_res == 0.25 || vert_res == 0.5 || vert_res == 1)
done = 0;
else
    fprintf('\n** Valor invalido. Entre "0" para cancelar. **\n\n')
end
end

init_res = sicklms('init','/dev/ttys2',38400);
% angle options: 100/180 and 0.25/0.5/1.0
sicklms('variant',vert_angle,vert_res);

SerPIC = serial('/dev/ttyS0'); % cambio de 0 --> 1
set(SerPIC,'BaudRate',38400, 'DataBits', 8,'Parity','none', 'StopBits',
1,'FlowControl', 'none','terminator','CR');
fopen(SerPIC);

fprintf(SerPIC, 'A%d\n', horz_res)
% fprintf(SerPIC, 'E');
% resp = fscanf(SerPIC,'%d\n')

fprintf(SerPIC, 'B%d\n', horz_angle)
% fprintf(SerPIC, 'F');
% resp = fscanf(SerPIC,'%d')

set(SerPIC,'Timeout',60)
fprintf(SerPIC, 'C');
fprintf('\nCalibrando ponto "0". Espere.\n')
resp = fscanf(SerPIC, '%d');

```

```

if resp == 'B'
    fprintf('\n** Erro em calibrar ponto "0". Escaneamento cancelado. **\n')
clearsicklms;
fclose(SerPIC)
    delete(SerPIC)
return
end

scan = 1;
set(SerPIC, 'Timeout', 20);
fprintf(SerPIC, 'D%d\n', scan);
fprintf('Scaneando...\n')
i=1;
resp = fscanf(SerPIC, '%d');
while resp ~= 'A'
    THETA(i) = resp;
    DATA = sicklms('grab');
    R(:,i) = DATA.range;
    i = i+1;
    fprintf(SerPIC, 'X');
    resp = fscanf(SerPIC, '%d');
end

fprintf(SerPIC, 'J0');
fprintf('Retornando ao ponto "0"\n')
resp = fscanf(SerPIC, '%d');

clear sicklms;
fclose(SerPIC)
delete(SerPIC)

PHI = -vert_angle/2:vert_res:vert_angle/2;
PHI = deg2rad(PHI);

enc_res = 180/2500;
THETA = THETA * enc_res;
THETA = deg2rad(THETA);

[THETA PHI] = meshgrid(THETA, PHI);

[X Y Z] = sph2cart(THETA, PHI, R);
Z = -Z;

fprintf('Escaneamento completo.\n')

%=====

```