

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DE COMPUTAÇÃO

---

# Desenvolvimento de Rotas para Monitorar Ambientes Internos

Heitor Luis Polidoro

---



São Carlos / SP  
Junho de 2010

# Desenvolvimento de Rotas para Monitorar Ambientes Internos

Heitor Luis Polidoro

**Orientador:** Prof. Dr. Denis Fernando Wolf

Monografia apresentada ao Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - ICMC-USP, para a obtenção do título de Mestre em Ciências de Computação e Matemática Computacional.

**Área de Concentração:**

Robótica Móvel, Monitoramento, Navegação.

São Carlos / SP

Junho de 2010

---

# Dedicatória

---

Aos meus pais, Heitor e Sonia, pelo esforço, carinho, educação, dedicação e amor.

---

# Agradecimentos

---

Agradeço primeiramente à Deus por me permitir realizar este projeto de Mestrado.

Ao professor Denis Fernando Wolf pela orientação, incentivo e paciência.

Ao Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - ICMC-USP - por prover os recursos necessários para minha formação e conclusão desse projeto de Mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES - pelo suporte financeiro à esse projeto de Mestrado.

E a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão desse projeto de Mestrado.

*“Na mudança de atitude não há mal que não se mude nem doença sem cura.  
Na mudança de postura a gente fica mais seguro.  
Na mudança do presente a gente molda o futuro.”*

**Gabriel, O Pensador**

---

# Resumo

---

A robótica móvel é uma área de pesquisa que está obtendo grande atenção da comunidade científica. O desenvolvimento de robôs móveis autônomos, que sejam capazes de interagir com o ambiente, aprender e tomar decisões corretas para que suas tarefas sejam executadas com êxito é o maior desafio em robótica móvel. O desenvolvimento destes sistemas inteligentes e autônomos consiste em uma área de pesquisa multidisciplinar considerada recente e extremamente promissora que envolve; por exemplo, inteligência artificial, aprendizado de máquina, estimação estatística e sistemas embarcados. Dentro desse contexto, esse trabalho aborda o problema de navegação e monitoramento de ambientes utilizando robôs móveis. Dada uma representação do ambiente (mapa topológico) e uma lista com urgências de cada uma das regiões do mapa, o robô deve estimar qual o percurso mais eficiente para monitorar esse ambiente. Uma vez que a urgência de cada região não visitada aumenta com o tempo, o trajeto do robô deve se adaptar a essas alterações. Entre as diversas aplicações práticas desse tipo de algoritmo, destaca-se o desenvolvimento de sistemas de segurança móveis inteligentes. Experimentos com diferentes algoritmos em diferentes ambientes são apresentados.

---

# Sumário

---

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Contextualização . . . . .	1
1.2	Motivação . . . . .	4
1.3	Objetivos . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Robôs Móveis</b>	<b>5</b>
2.1	Locomoção . . . . .	5
2.2	Sensores . . . . .	8
2.2.1	Odômetro . . . . .	8
2.2.2	LASER . . . . .	9
2.3	Robô Pioneer . . . . .	9
2.4	Player . . . . .	10
2.4.1	Interface dos Drivers . . . . .	11
2.5	Stage . . . . .	12

---

<b>3</b>	<b>Navegação de Robôs Móveis</b>	<b>16</b>
3.1	Localização . . . . .	18
3.2	Representação do Mapa . . . . .	19
3.3	Planejamento de Trajetória . . . . .	20
3.3.1	<i>Roadmap</i> . . . . .	20
3.3.2	Decomposição em Células . . . . .	21
3.3.3	Campos Potenciais . . . . .	22
3.4	Desvio de Obstáculos . . . . .	23
3.4.1	<i>Vector Field Histogram</i> . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Grafos e Aplicações</b>	<b>27</b>
4.1	Grafos . . . . .	27
4.2	Busca do Menor Caminho . . . . .	29
4.2.1	Algoritmo de Dijkstra . . . . .	29
4.3	Caixeiro-Viajante . . . . .	30
4.4	Considerações . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Resultados Obtidos</b>	<b>33</b>
5.1	Critérios de Avaliação . . . . .	33
5.2	Metodologia . . . . .	35
5.3	Soluções . . . . .	36
5.3.1	<i>Offline</i> . . . . .	36
5.3.1.1	Gerador . . . . .	37



5.3.1.2	Avaliador . . . . .	41
5.3.2	Tempo Real . . . . .	44
5.4	Resultados . . . . .	44
5.4.1	Análise Comparativa . . . . .	52
5.5	Conclusão . . . . .	53

---

# Lista de Figuras

---

1.1	Exemplos de robôs. . . . .	3
2.1	Potência por velocidade de vários mecanismos de locomoção: (a) Rastejar e deslizar. (b) Correr. (c) Pneu em chão suave. (d) Andar. (e) Em ferrovia. (1) Unidade de potência (Cavalos/toneladas). (2) Velocidade (milhas/hora) [31]. . . . .	6
2.2	Quatro tipos básicos de roda. (a) Roda padrão. (b) Roda castor. (c) Roda sueca. (d) Bola ou roda esférica [31]. . . . .	7
2.3	Exemplo de Funcionamento do LASER . . . . .	9
2.4	Robô Pioneer. . . . .	10
2.5	Interface usual. . . . .	11
2.6	Interface do Player . . . . .	13
2.7	Interface e Modelo Cliente-Servidor . . . . .	13
2.8	Abstração de Hardware . . . . .	14
2.9	Exemplo de Clientes e Servidores . . . . .	14
2.10	Simulação com 5 robôs, 2 objetos, LASER, sonar e <i>blobfinder</i> . . . . .	15

3.1	Hierarquia do controle de um robô móvel mostrando o fluxo de informação.	17
3.2	Exemplos de mapas. . . . .	20
3.3	Exemplo de um diagrama de Voronoi. [31] . . . . .	21
3.4	Exemplo de um mapa com decomposição em células. . . . .	22
3.5	Exemplo de um mapa com campos potenciais. [26] . . . . .	23
3.6	(a) Exemplo de um mapa. (b) Grade de histograma correspondente. [5] . .	25
3.7	(a) Densidade polar de obstáculo em um histograma polar relativo à posição do robô em $O$ (Figura 3.6(b)). (b) O mesmo histograma polar de (a) mostrado em forma polar e por cima da grade de histograma da Figura 3.6(b). [5] . . . . .	26
4.1	Exemplo de grafos [38] . . . . .	28
4.2	Dodecaedro de Hamilton. [4] . . . . .	29
4.3	Exemplo de possíveis sub-rotas. [3] . . . . .	31
5.1	Exemplo de mapa: Museu do homem sergipano e suas divisões . . . . .	34
5.2	Fluxograma do <b>geradpr</b> . . . . .	38
5.3	Grafo completo das salas. . . . .	40
5.4	Um agente em cada sala, e a fila de <i>agentes</i> . . . . .	40
5.5	Removendo o <i>agente a</i> . . . . .	40
5.6	Inserindo os <i>agentes e, f e g</i> . . . . .	41
5.7	Removendo o <i>agente b</i> e inserindo os <i>agentes h, i e j</i> . . . . .	41
5.8	Fluxograma do <b>avaliador</b> . . . . .	43
5.9	Grafo do Mapa Quatro. . . . .	45
5.10	Gráfico do Mapa Quatro. . . . .	46

---

5.11 Gráfico do Mapa Quatro Diff. . . . .	47
5.12 Grafo do Mapa X. . . . .	48
5.13 Gráfico do Mapa X. . . . .	48
5.14 Grafo do Mapa X Incompleto. . . . .	49
5.15 Gráfico do Mapa X Incompleto. . . . .	50
5.16 Grafo do Mapa . . . . .	50
5.17 Gráfico do Mapa Espinha. . . . .	51
5.18 Gráfico do Mapa Espinha Diff. . . . .	54
5.19 Grafo do Mapa Apartamento. . . . .	54
5.20 Gráfico do Mapa Apartamento. . . . .	55
5.21 Tendência de Desempenho . . . . .	57

---

## Lista de Tabelas

---

5.1	Exemplo de prioridades . . . . .	34
5.2	Exemplo de prioridades . . . . .	44
5.3	Exemplo de chances de emergência . . . . .	44
5.4	Mapas para testes . . . . .	45
5.5	Prioridades do Mapa Quatro. . . . .	45
5.6	Prioridades relativas do Mapa Quatro. . . . .	46
5.7	Frequências Relativas do Mapa Quatro. . . . .	47
5.8	Prioridades do Mapa Quatro Diff. . . . .	47
5.9	Prioridades relativas do Mapa Quatro Diff. . . . .	48
5.10	Frequências Relativas do Mapa Quatro Diff. . . . .	49
5.11	Prioridades do Mapa X. . . . .	49
5.12	Prioridades relativas do Mapa X. . . . .	50
5.13	Frequências Relativas do Mapa X. . . . .	51
5.14	Prioridades relativas do Mapa X Incompleto. . . . .	51

---

5.15	Frequências Relativas do Mapa X Incompleto. . . . .	52
5.16	Prioridades do Mapa Espinha. . . . .	52
5.17	Prioridades relativas do Mapa Espinha. . . . .	52
5.18	Frequências Relativas do Mapa Espinha. . . . .	53
5.19	Prioridades do Mapa Espinha Diff. . . . .	53
5.20	Prioridades relativas do Mapa Espinha Diff. . . . .	53
5.21	Frequências Relativas do Mapa Espinha Diff. . . . .	54
5.22	Prioridades do Mapa Apartamento. . . . .	55
5.23	Prioridades relativas do Mapa Apartamento. . . . .	55
5.24	Frequências Relativas do Mapa Apartamento. . . . .	56
5.25	Média dos Últimos Dez Mil Segundos. . . . .	56

---

## Lista de Algoritmos

---

5.3.1 gerador . . . . .	39
5.3.2 avaliador . . . . .	43

# Introdução

---

## 1.1 Contextualização

A robótica é uma tecnologia utilizada para auxiliar ou substituir o homem em tarefas que o ser humano não é capaz de executar; em tarefas que podem ser automatizadas; em tarefas em ambientes com alto grau de periculosidade, como fundo do mar, incêndios, desarmamento de bombas, áreas com contaminação radioativa ou com gases tóxicos e em tarefas repetitivas como uma linha de produção industrial, por exemplo.

Dentre as muitas definições de robô podemos destacar:

- Dispositivo ou máquina que realiza funções normalmente associadas a seres humanos [20];
- Máquinas que, além de serem capazes de reproduzir tarefas e movimentos implícitos em sua construção, complementam a parte mecânica com dispositivos eletrônicos inteligentes [20];
- Órgão mecânico versátil equipado com atuadores e sensores sob o controle de um sistema computacional [18] e



- Simplesmente um agente artificial e ativo cujo ambiente é o mundo físico [29].

Inicialmente os robôs eram utilizados somente para automação industrial, fixados em posições específicas na linha de montagem, os braços robóticos podem mover-se a uma grande velocidade e precisão para realizar tarefas repetitivas. No entanto esses robôs apresentam uma fundamental desvantagem que é a falta de mobilidade. Um manipulador fixo tem alcance limitado que depende de onde foi colocado enquanto que robôs móveis são capazes de locomoverem-se pela fábrica [31]. Com a evolução tecnológica os robôs passaram a ser utilizados em outras áreas como: medicina de precisão, ambientes perigosos, ambientes insalubres, na área de entretenimento, serviços domésticos, etc. Nesse contexto surgiram as pesquisas para o desenvolvimento de robôs móveis autônomos, que sejam capazes de atuar em ambientes reais e reagir a situações desconhecidas de forma inteligente [36].

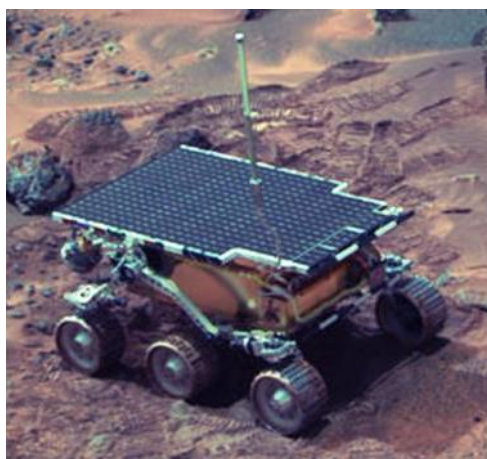
Entre todas essas diversas aplicações da robótica móvel, pode-se citar o robô Sojourner (Figura 1.1(a)) da NASA, que explorou e enviou fotos e outras muitas informações do planeta Marte para a Terra [23], e o robô desenvolvido pela universidade Carnegie Mellon, chamado Groundhog, que explora minas abandonadas, que além do risco de desabamento, em muitos casos também contém gases tóxicos [35].

A comunidade científica aposta que sistemas robóticos estejam cada vez mais presentes em nossa vida cotidiana, o que torna esta área de pesquisa extremamente promissora e desafiadora. Segundo Bill Gates [12], a humanidade está entrando numa nova era da computação, comparando os robôs industriais com os *mainframes* de antigamente, e este autor prevê que existirá um robô em cada casa no futuro.

A robótica consiste em uma área multidisciplinar de pesquisa, envolvendo desde elementos de engenharia mecânica, elétrica, computação até áreas de humanas como psicologia e estudos comportamentais. O que diferencia a robótica móvel de outras áreas de pesquisa em robótica, é a sua ênfase nos problemas relacionados com locomoção em ambientes complexos, que se modificam dinamicamente, compostos tanto por obstáculos fixos quanto por obstáculos móveis. Para operar nesses ambientes o robô deve ser capaz de adquirir e utilizar conhecimento sobre o ambiente, tais como: estimar posições dentro do ambiente (sua posição, de um obstáculo, de um *landmark*, de uma meta), reconhecer obstáculos, e responder em tempo real às situações que podem ocorrer nesses ambientes. As tarefas de perceber o ambiente, localizar-se no ambiente e mover pelo ambiente são problemas fundamentais da robótica móvel [15].

A robótica móvel, além de ser uma área de grande potencial científico, tem atraído

a atenção de empresas de tecnologia que cada vez mais investem no desenvolvimento de produtos; como por exemplo os robôs que realizam trabalhos domésticos autonomamente, entre os quais o aspirador de pó Roomba da IRobot [16] (Figura 1.1(b)) e o robô cortador de grama Robomow (Figura 1.1(c)) da Friendly Robotics [11]. Ambos apresentam sucesso comercial.



(a) Sojourner



(b) Roomba



(c) Robomow

Figura 1.1: Exemplos de robôs.

Robôs móveis podem ser classificados quanto à sua mobilidade como: humanóides, com pernas, com rodas, com esferas, aéreos e aquáticos. Robôs com rodas são mais simples de serem construídos e mais fáceis de controlar, as rodas permitem uma maior praticidade de locomoção e dão um maior suporte estático aos robôs terrestres [29]. A autonomia de robôs móveis é essencial em ambientes remotos, tais como outros planetas, onde, devido à distância, o tempo de comunicação entre o robô e seu operador não permite a execução de ações em tempo real.

Normalmente, a navegação é a principal tarefa a ser executada por um robô móvel.

Esta consiste na localização do robô no ambiente, planejamento de um caminho entre a posição inicial e o destino final e a execução do movimento pelo caminho planejado. Esta tarefa pode ser mais, ou menos complexa, dependendo do ambiente em que o robô se encontra [27] e das informações que ele possui.

## 1.2 Motivação

O desenvolvimento de sistemas para controlar robôs móveis autônomos tem se mostrado um grande desafio para a Inteligência Artificial. Diferentes abordagens de sistema de controle para robôs móveis autônomos vêm sendo utilizadas em diversas áreas de pesquisa. Existem diversas aplicações possíveis para robôs móveis (transporte, vigilância, inspeção, limpeza, exploração, auxílio a deficientes físicos e etc.) [15].

A motivação desta dissertação de mestrado é desenvolver um sistema de monitoramento de ambientes internos. Existem diversas aplicações práticas para esse tipo de aplicação. Dentre elas, pode-se citar o desenvolvimento de um robô vigia que monitora um ambiente, dando ênfase para áreas de maior importância; um robô que monitora a temperatura e umidade de ambientes onde esse fator é crítico; um robô que faz coleta de lixo ou correspondência; um robô para fazer limpeza de ambientes; um robô para fazer entregas de remédios a pacientes em um hospital e etc.

## 1.3 Objetivos

A proposta desta dissertação é desenvolver soluções de robótica móvel para o monitoramento de ambientes internos, onde normalmente, nesses ambientes, existem regiões críticas para serem monitoradas, cada qual com sua prioridade. A prioridade (urgência) da visita de cada uma dessas regiões aumenta conforme o tempo passa e essa região não é visitada. Ao ser visitada, a urgência de uma determinada região é, então, zerada.

# **Robôs Móveis**

---

Este capítulo apresenta as principais características dos Robôs Móveis Autônomos. Um robô móvel autônomo é dotado de três características importantes: Ativadores, responsáveis, entre outras coisas pela locomoção; Sensores, que fazem o papel da percepção do robô e Controle, que aciona os ativadores de acordo com a leitura dos sensores, seguindo o propósito para qual o robô está sendo utilizado.

## **2.1 Locomoção**

Robôs móveis precisam de mecanismos de locomoção que os permitam moverem-se livremente pelo ambiente, mas existe uma grande variedade de modos de se locomover: andar, pular, correr, deslizar, patinar, nadar ou voar, utilizando rodas ou esteiras [31]. A maioria dos mecanismos de locomoção são inspirados na natureza, exceto os que usam rodas, esteiras ou propulsão (aquática ou aérea).

Robôs com rodas são os mais populares por inúmeras razões. Eles são mecanicamente simples de construir. A razão da carga peso/mecanismo é favorável. Os outros mecanismos geralmente precisam de um hardware mais complexo para carregarem a

mesma carga [17]. São mais eficientes em gasto de potência por velocidade como mostra a Figura 2.1. Além disso, como os robôs com rodas são projetados para três ou mais rodas estarem em contato com o chão todo o tempo, o equilíbrio não é usualmente um problema pesquisado [31].

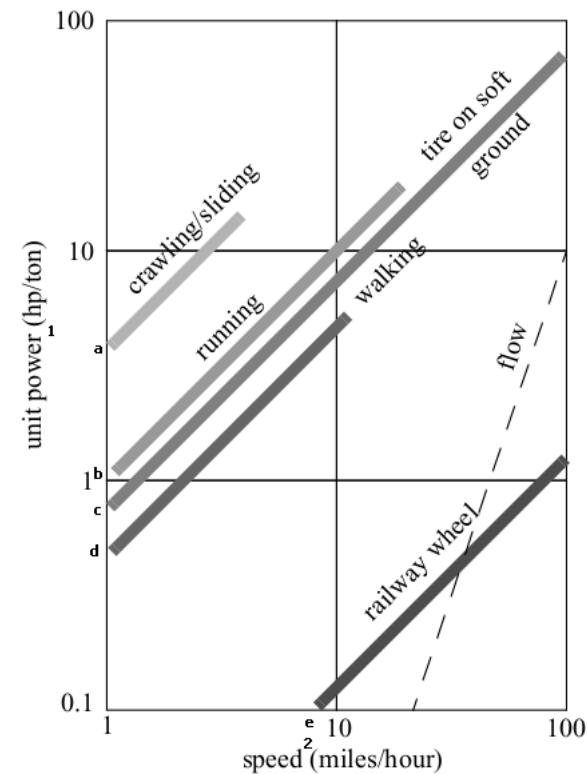


Figura 2.1: Potência por velocidade de vários mecanismos de locomoção: (a) Rastejar e deslizar. (b) Correr. (c) Pneu em chão suave. (d) Andar. (e) Em ferrovia. (1) Unidade de potência (Cavalos/toneladas). (2) Velocidade (milhas/hora) [31].

Ao invés de se preocuparem com o equilíbrio, as pesquisas em robôs com rodas tendem a focar em problemas como tração, estabilidade, manobrabilidade e controle [31].

Existem quatro classes principais de rodas, como é mostrado na Figura 2.2. Elas se diferenciam grandemente na sua cinemática, e portanto, a escolha da classe de roda tem um grande impacto na cinemática do robô móvel. A roda padrão e a roda castor têm um eixo primário de rotação e são portanto altamente direcionais. Para mover em uma direção diferente, a roda precisa ser direcionada primeiro ao longo do eixo vertical. A diferença entre essas duas rodas é que a roda padrão consegue concluir seu direcionamento sem efeitos colaterais; porque o centro de rotação passa pelo contato com o chão, ao passo que a roda castor rotaciona em torno de um eixo deslocado, causando uma força a ser transmitida para o chassi do robô durante o direcionamento [31].

As funções da roda sueca são as de uma roda normal, mas provêm baixa resistên-

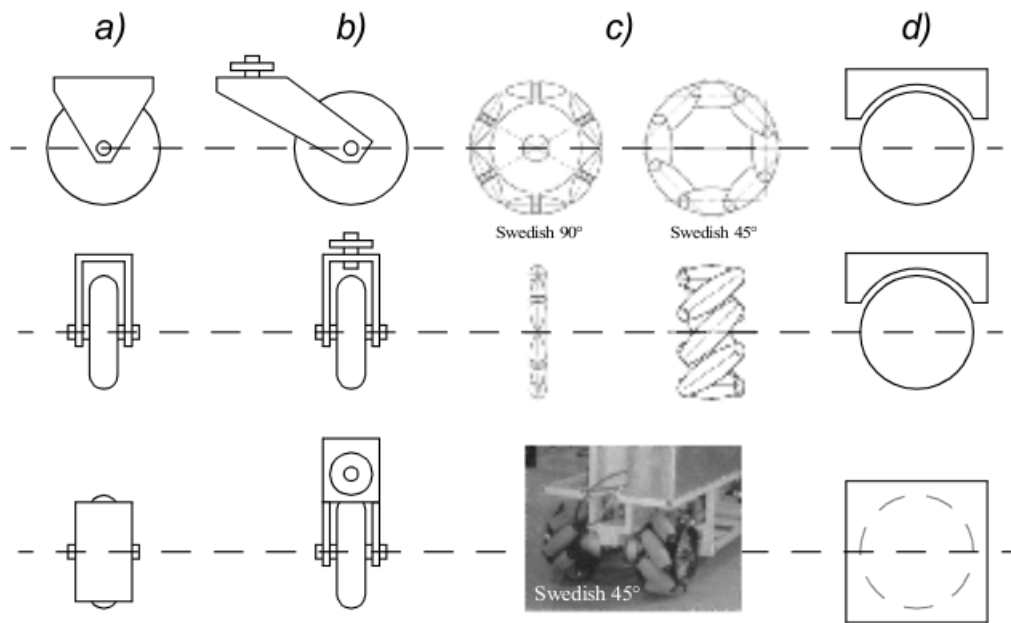


Figura 2.2: Quatro tipos básicos de roda. (a) Roda padrão. (b) Roda castor. (c) Roda sueca. (d) Bola ou roda esférica [31].

cia em outra direção, algumas vezes perpendicular à direção convencional, como a Sueca 90, e algumas vezes em um ângulo intermediário, como a Sueca 45. Os pequenos roletes ao redor da roda são passivos. A vantagem principal desse modelo é que enquanto a rotação é provida somente através de um eixo principal, a roda pode cinematicamente mover-se com pouco atrito em diferentes possíveis trajetórias, não somente para frente e para trás [31].

A roda esférica é uma roda omnidirecional verdadeira, muitas vezes projetada de modo que ela possa ser alimentada ativamente para girar ao longo de qualquer direção. Um modo para implementar a roda esférica é imitar o *mouse* do computador, provendo ativamente rolamentos alimentados que encostam na superfície superior da esfera e concedem força rotacional [31].

A principal desvantagem das rodas é que elas necessitam de uma rua ou uma superfície relativamente plana [6], sendo que em terrenos desiguais, elas podem ter uma performance pobre. Genericamente, se a altura do objeto for aproximadamente o raio da roda a roda não consegue passar sobre esse objeto. Uma solução simples seria utilizar rodas grandes o suficiente, mais que o dobro da altura de quaisquer possíveis obstáculos, mas em muitos casos isso é impraticável [17].

## 2.2 Sensores

Uma das tarefas mais importantes em um sistema autônomo de qualquer tipo é adquirir conhecimento sobre o ambiente. Isso é feito adquirindo medidas usando vários sensores e extraindo informações significativas dessas medidas [31]. Existe um vasto número de sensores sendo usados em robótica, aplicando diferentes técnicas de medidas e usando diferentes interfaces [6]. Como humanos, nós conseguimos ver uma xícara em cima da mesa e, sem pensar muito, conseguimos pegar essa xícara. De fato, completar a simples tarefa de alcançar e erguer uma xícara requer uma combinação complexa de sensores, interpretação, cognição e coordenação [17].

Alguns sensores são utilizados para medidas simples como a temperatura interna do robô ou a velocidade de rotação dos motores, mas outros mais sofisticados podem ser utilizados para adquirir informação sobre o ambiente ou até para medir diretamente a posição global do robô [31].

Pode-se classificar os sensores em dois importantes eixos funcionais: proprioceptivo/exteroceptivo e passivo/ativo [31]. **Proprioceptivos** são os sensores que medem valores internos ao sistema, como velocidade do motor, voltagem bateria, ângulo dos braços por exemplo. **Exteroceptivos** são os sensores que adquirem informações sobre o ambiente do robô, como medidas de distância, intensidade de luz e amplitude do som, por exemplo. Conseqüentemente, as medidas de sensores exteroceptivos são interpretadas pelo robô para extrair as informações significantes do ambiente. **Passivos** são sensores que medem parâmetros do ambiente que entram no sensor. Por exemplo: sondas de temperatura, microfones e câmeras. **Ativos** são sensores que emitem energia para o ambiente, então medem a reação do ambiente à essa energia. Sensores deste tipo têm uma performance superior, entretanto, existem alguns riscos, como a falta de energia, que pode afetar a característica que o sensor está tentando medir. Sensores ativos também podem sofrer interferências de sinais que estão fora do seu controle. Por exemplo, sinais emitidos por robôs próximos ou sensores similares no mesmo robô, podem influenciar no resultado das medidas. Exemplos de sensores ativos incluem sensores ultra-sônicos, sonares, e LASERs para medir distância [31].

### 2.2.1 Odômetro

O odômetro é um sensor proprioceptivo que mede as rotações das rodas e baseado nessa informação é possível determinar a posição do robô no mapa. O principal problema

dos odômetros é com relação à sua precisão, pois muitos fatores podem atrapalhar a leitura, como por exemplo, uma roda patinando ou um pneu murcho poderá fazer com que o odômetro interprete que o robô esteja fazendo um movimento diferente do real. Para corrigir esse tipo de problema existem os algoritmos de localização, que serão explicados em 3.1.

### 2.2.2 LASER

O LASER é um sensor Exteroceptivo Ativo, pois ele emite um sinal de luz e calcula a distância do objeto em relação ao sensor. Um emissor envia o sinal e calcula o tempo que esse sinal demora para retornar ao emissor, com isso é possível calcular a distância naquela direção, e através de um espelho rotativo é possível atingir até  $360^\circ$  de alcance. A Figura 2.3 mostra um LASER  $180^\circ$ .

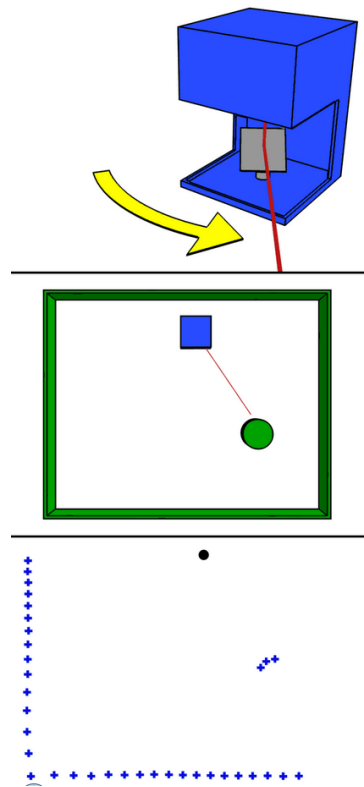


Figura 2.3: Exemplo de Funcionamento do LASER

## 2.3 Robô Pioneer

O Pioneer 3 DX (Figura 2.4) é o robô disponível para testes experimentais no Laboratório de Robótica Móvel (ICMC - USP), ele é um robô móvel ágil e versátil. Cons-



truído em um sistema cliente-servidor, ele oferece um processamento de visão *onboard*, comunicação *ethernet*, LASER, GPS, sonar, e outras funções autônomas. Para programá-lo deve-se utilizar a biblioteca Player [21].

O Pioneer 3 DX pode carregar até 23kg, chega até 1.6 m/s, possui rodas de 19cm, oito sonares na parte frontal e um computador interno com algumas funções já implementadas, como a utilizada no projeto que é o desvio de obstáculos utilizando o algoritmo VFH (*Vector Field Histogram* explicado na seção 3.4.1).



Figura 2.4: Robô Pioneer.

## 2.4 Player

O Player é um servidor de rede para controlar robôs. Executando embarcado no robô, o Player provê uma interface simples e clara dos sensores e atuadores do robô sobre uma rede IP. O programa cliente “conversa” com o Player utilizando sockets TCP, lendo dados dos sensores, escrevendo comandos nos atuadores e configurando dispositivos em tempo de execução. O servidor Player foi desenvolvido para que seus clientes sejam independentes de linguagem e de plataforma. O programa cliente pode ser executado em qualquer máquina que tenha conexão de rede com o robô, e pode ser escrito em qualquer linguagem que suporte sockets TCP. Atualmente existem clientes disponíveis em C++, Tcl, Java e Python [28]. Futuramente o Player será indiferente sobre como o programa de controle do robô é estruturado, ou seja, poderá escrever desde programas *multi-threads* altamente concorrentes até programas sequencias simples.

### 2.4.1 Interface dos Drivers

Usualmente as interfaces entre o programa do usuário e o robô se dá como mostra a Figura 2.5, onde o programa do usuário tem que fazer a aquisição de dados diretamente dos sensores e tratar esses dados de modo que o planejador compreenda. E gerar os comandos para o motor ou outros atuadores. Sendo que para cada modelo de motor, os comandos são diferentes, assim como cada câmera, LASER e outros sensores têm leituras diferentes de acordo com o modelo.

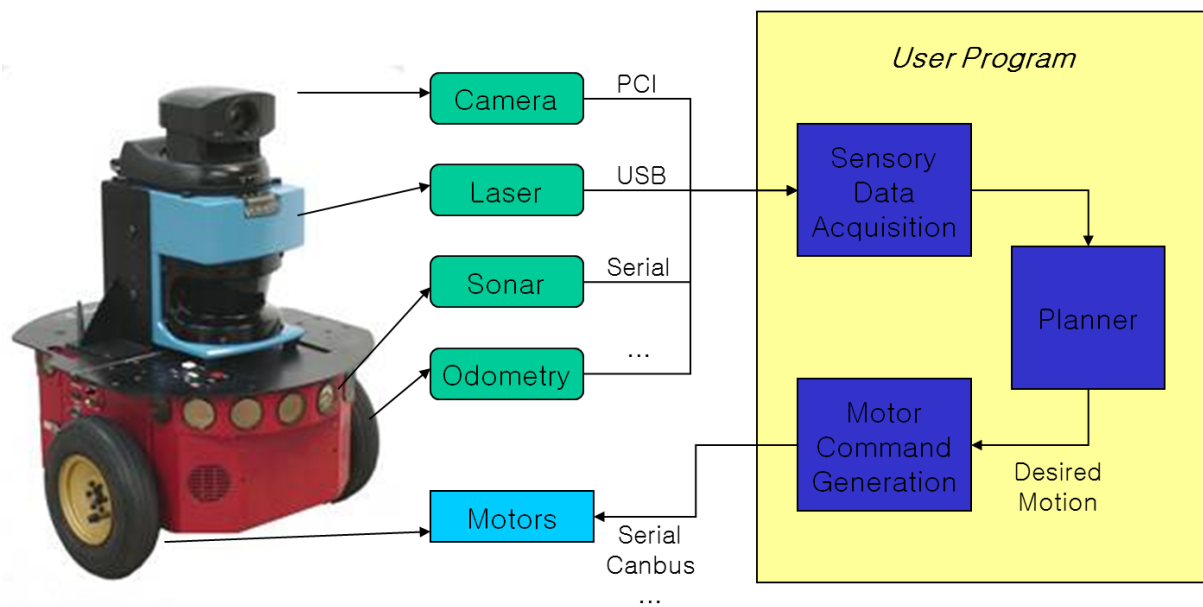


Figura 2.5: Interface usual.

O Player tem como função fazer essa interface entre os sensores e atuadores e o programa do usuário (Figura 2.6), adquirindo os dados de qualquer modelo de um mesmo sensor (que seja aceito pelo Player) e fornecendo ao programa do usuário os dados já tratados, ou seja, para qualquer modelo de um mesmo sensor (que seja aceito pelo Player) o programa do usuário lê da mesma forma, assim como para os atuadores como mostra a Figura 2.7. Por exemplo, para fazer com que o robô ande para frente na velocidade de 1 m/s, basta o programa do usuário informar a direção e velocidade, o comando vai ser o mesmo para diversos modelos de robôs, que possuem tamanhos e números de rodas diferentes, o que realiza os cálculos para determinar qual a rotação da roda para atingir tal velocidade é a interface do Player, assim como para ler do sensor LASER, basta informar de qual ângulo quer ler.

A Figura 2.7 também ilustra o funcionamento do modo Cliente-Servidor do Player, como a comunicação é feita por meio de *sockets* o programa cliente pode ser escrito em

qualquer linguagem que permita comunicação através de *sockets*. Esse modo Cliente-Servidor também permite a fácil utilização de diversos simuladores, pois como a comunicação é a mesma, o programa cliente não sabe se está interagindo com o robô real ou com algum simulador (Figura 2.8).

Esse modelo Cliente-Servidor também trás outras vantagens como:

- Clientes podem se conectar a múltiplos servidores;
- Servidores aceitam conexão de múltiplos clientes;
- Diferentes programas/processos/*threads* podem processar dados de diferentes sensores do mesmo servidor.

A Figura 2.9 ilustra esse funcionamento, onde a letra 'P' indica que naquele dispositivo existe um programa Player sendo executado e a letra 'C' indica que naquele dispositivo está sendo executado um programa cliente.

## 2.5 Stage

O Stage é usado normalmente como um *plugin* para o Player, provendo uma série de dispositivos virtuais para os clientes Player. Os usuários escrevem as rotinas e algoritmos normalmente, como clientes para um servidor Player. Não é possível para clientes distinguir a diferença entre os dispositivos reais do robô e os equivalentes simulados pelo Player/Stage. Com isso clientes Player desenvolvidos usando o Stage precisarão de pouca ou nenhuma modificação para trabalhar com o robô real e vice-versa. Em muitos casos, basta somente mudar no cliente o endereço IP de onde está o servidor. O Stage também pode simular uma população de robôs móveis, sensores e objetos num ambiente bidimensional (Figura 2.10) [28]. Nesta dissertação será utilizado somente um robô e o sensor LASER.

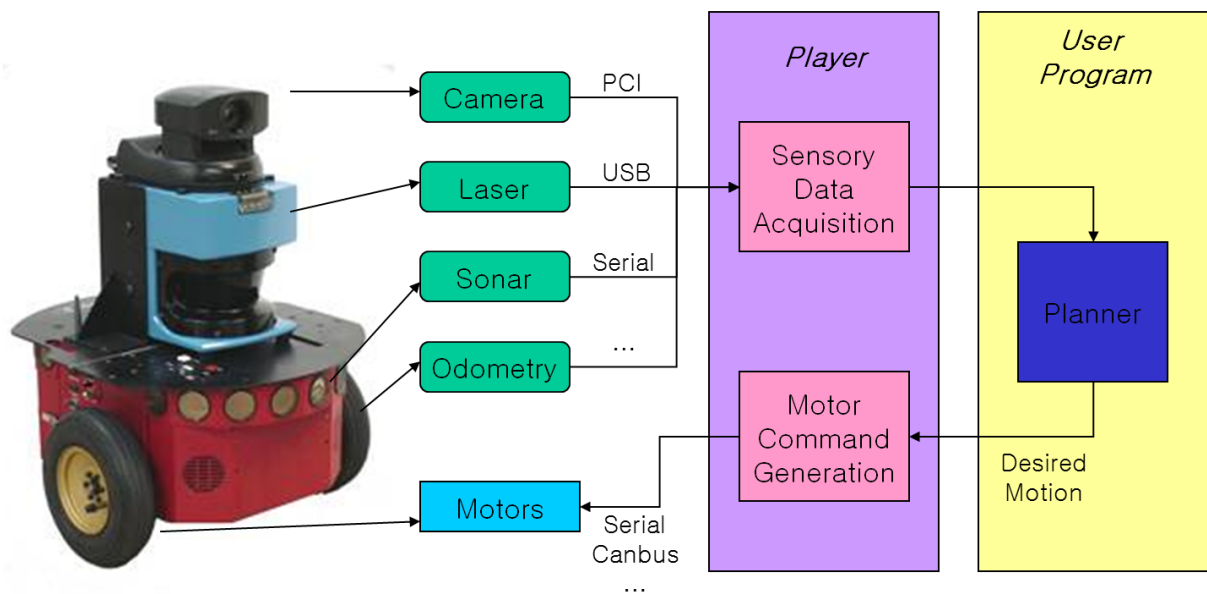


Figura 2.6: Interface do Player

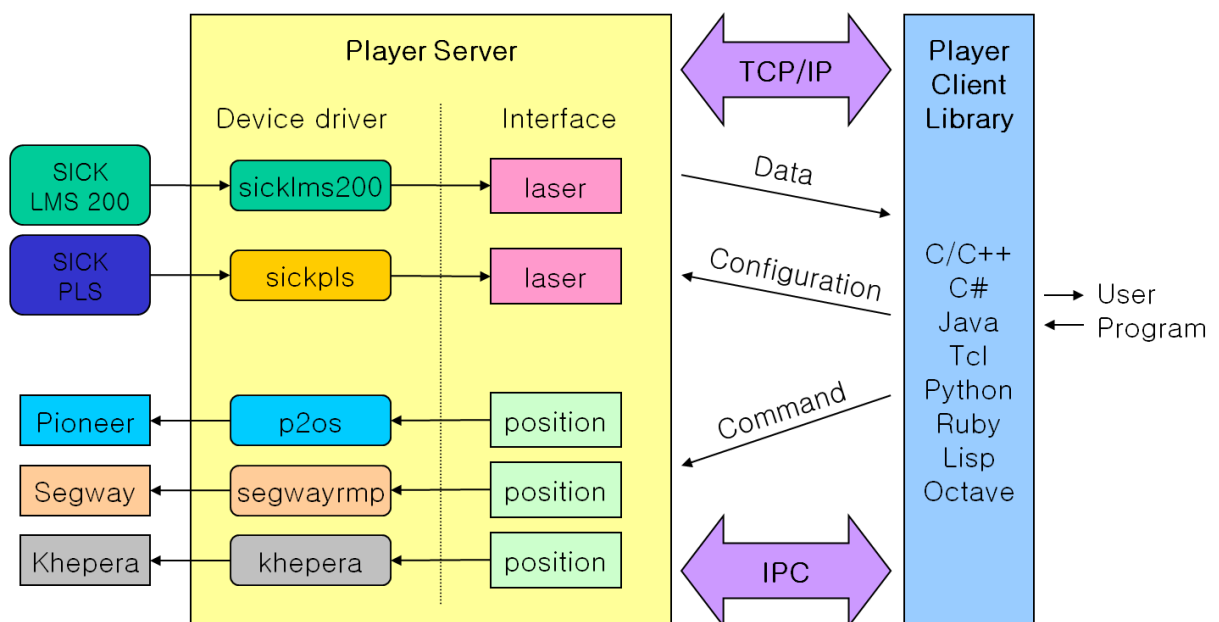


Figura 2.7: Interface e Modelo Cliente-Servidor

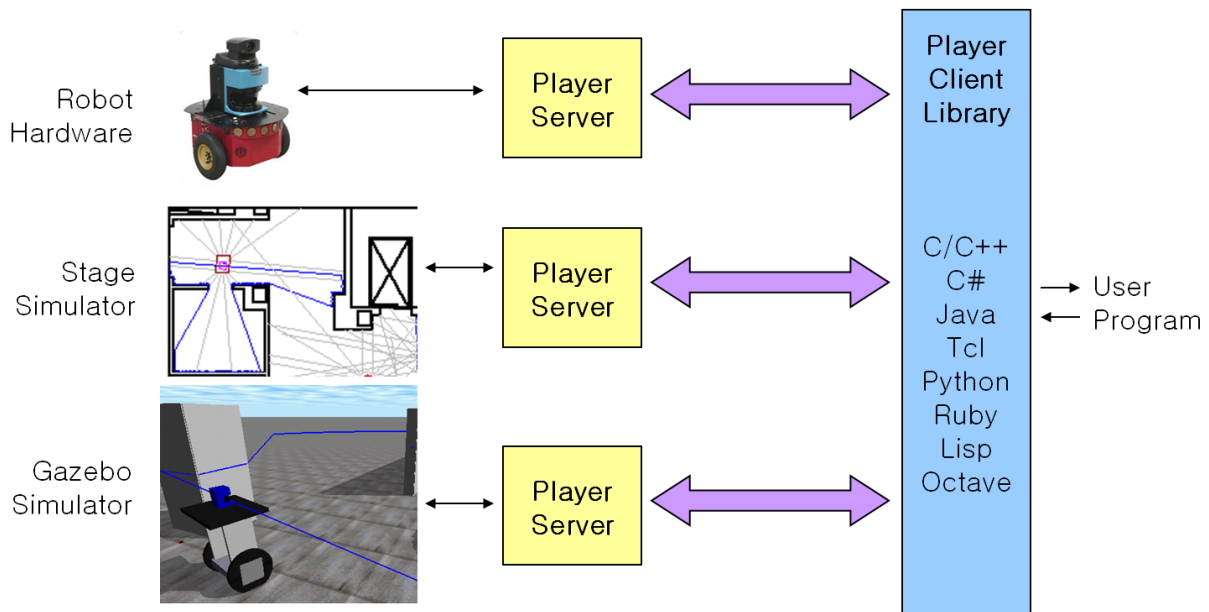


Figura 2.8: Abstração de Hardware

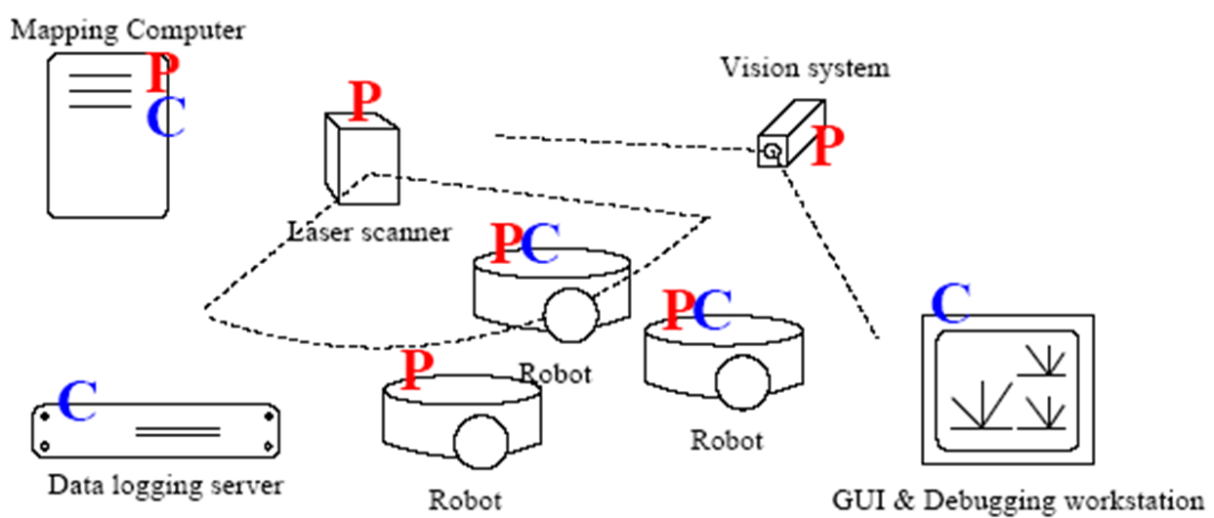


Figura 2.9: Exemplo de Clientes e Servidores

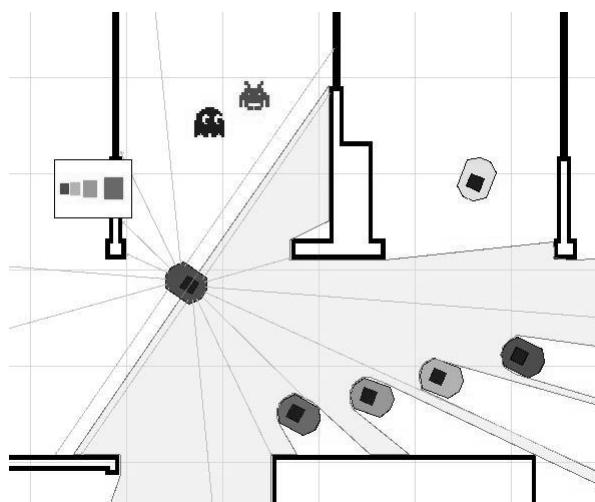


Figura 2.10: Simulação com 5 robôs, 2 objetos, LASER, sonar e *blobfinder*.

## Navegação de Robôs Móveis

---

Existem diversos problemas em aberto na robótica móvel. Uma dessas questões ainda não resolvida consiste em um robô com a habilidade de navegar em seu ambiente [17]. A navegação é a ciência, arte, prática ou tecnologia de planejar e percorrer uma trajetória de um ponto de origem até um ponto de destino.

Em robótica, navegação é a ciência de direcionar o percurso de um robô móvel enquanto percorre o meio ambiente (terra, água, ou ar). Inerente em qualquer esquema de navegação é o desejo de alcançar um destino sem se perder ou colidir com algum obstáculo [19]. Vagar é uma forma de navegação que consiste em o robô andar sempre em frente e desviando dos obstáculos. Em geral, navegação é um processo incremental que, segundo Murphy [22], pode ser resolvido respondendo a quatro perguntas:

- **Para onde estou indo?** Geralmente determinado por um humano ou uma missão;
- **Qual o melhor caminho?** Esse é o problema de planejamento de trajetória e é a área da navegação que recebe mais atenção;
- **Por onde passei?** Enquanto o robô explora o ambiente, pode ser parte da missão mapear esse ambiente;

- **Onde estou?** Para seguir uma trajetória ou construir um mapa o robô precisa saber onde ele está.

Essas questões podem ser sumarizadas em quatro passos segundo Goldberg [13]:

- Percepção e modelagem do ambiente;
- Localização;
- Planejamento e decisão do movimento;
- Execução do movimento;

A relação entre esses passos pode ser vista na Figura 3.1 [19].

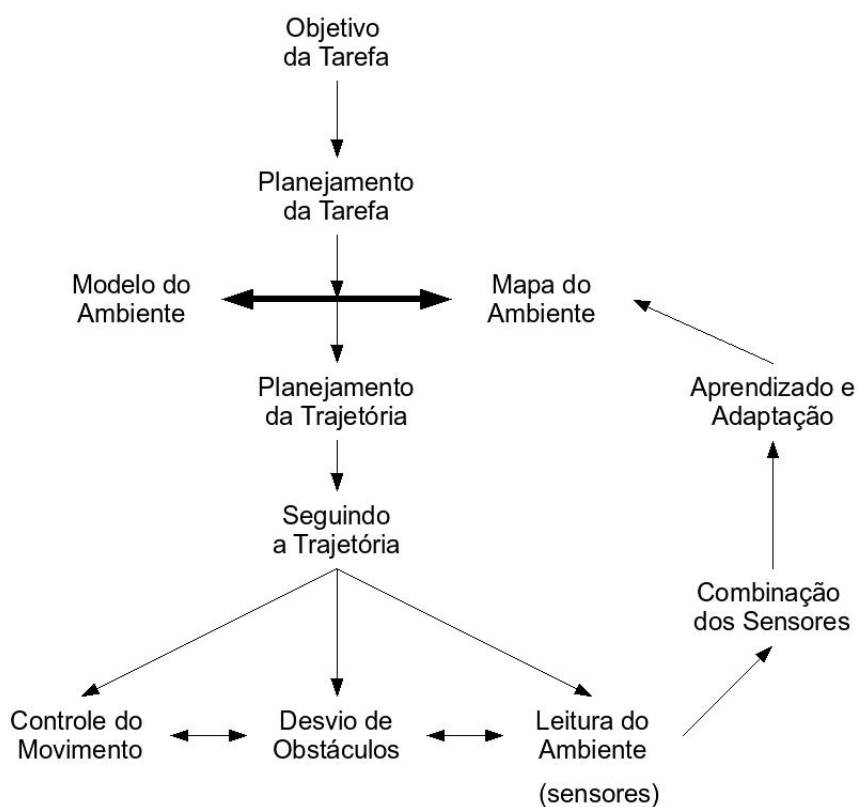


Figura 3.1: Hierarquia do controle de um robô móvel mostrando o fluxo de informação.

Navegação é a instância do paradigma geral da robótica “perceber - decidir - agir”. A implementação da tarefa de navegação pode ser mais ou menos complexa dependendo do contexto em que a tarefa vai ser executada [13].



- **O ambiente:** pode ser inicialmente conhecido, parcialmente conhecido ou completamente desconhecido, pode ser estático ou com objetos móveis;
- **A meta:** pode ser especificada por *landmarks* ou coordenadas;
- **A navegação em si:** pode ter restrições como tempo e melhor caminho;
- **As habilidades do robô:** poder de computação, sensores e suas incertezas, tamanho do robô e sua cinemática.

A solução para o problema de navegação vai depender de todas essas restrições [13].

A navegação pode ser dividida em duas grandes áreas: planejamento de trajetória e desvio de obstáculos. Para o planejamento da trajetória o robô utiliza uma representação do ambiente (total ou parcial) e planeja uma trajetória que o leve de seu ponto de origem até seu destino, atendendo a requisitos como menor caminho ou menos curvas, por exemplo. O desvio de obstáculos é utilizado principalmente em ambientes dinâmicos, onde possam haver obstáculos móveis; sua função é fazer com que o robô chegue em seu destino de forma segura, ou seja, não colida com obstáculos que podem ser móveis ou não, utilizando sensores geralmente de distância, como LASERs e sonares, ou até mesmo utilizando câmeras.

## 3.1 Localização

Localização de robôs móveis é o processo de se estimar a posição de um robô dentro do ambiente no qual está inserido [25]. Para fazê-lo é necessário que o robô utilize um mapa que modele o mundo ao seu redor e estime através deste modelo sua posição corrente e sua orientação. Sendo assim, a habilidade de estimar sua posição, através de seus sensores, é uma das pré-condições básicas para a autonomia de robôs móveis [2,7,37].

O mapa do ambiente pode ser obtido automaticamente por um robô que seria responsável por explorar previamente o ambiente ou manualmente projetado por um ser humano [9]. Para as técnicas de localização serem consideradas robustas, elas devem apresentar os seguintes requisitos [2,7,37]:

- Serem capazes de lidar com incertezas, pois os mapas que modelam o ambiente são geralmente imprecisos e os sensores, muitas vezes, não são perfeitos;

- Lidarem com simetria, uma vez que muitos locais possuem mapas que não podem ser diferenciados com apenas uma medida. Por exemplo, corredores em um escritório;
- Permitirem a integração da leitura de vários sensores diferentes, porque a fusão sensorial aumenta a confiabilidade do sistema compensando, assim, os possíveis ruídos.

## 3.2 Representação do Mapa

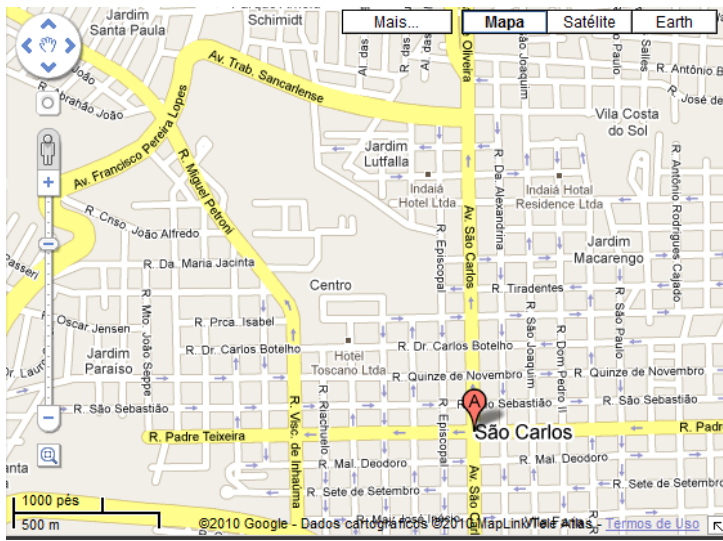
Representar o ambiente onde o robô se encontra é importante pois, decisões baseadas na representação do ambiente podem ter impacto nas escolhas disponíveis para a representação da posição do robô. Muitas vezes a fidelidade da representação da posição é limitada pela fidelidade do mapa [31].

Segundo Siegwart e Nourbakhsh [31], três relações fundamentais têm de ser entendidas quando se escolhe uma representação particular de mapa:

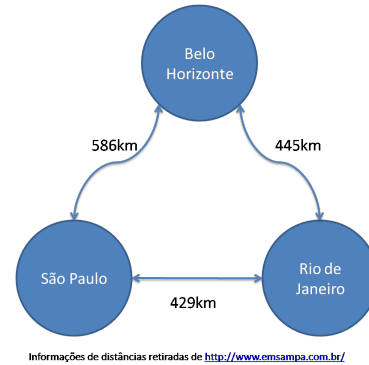
- A precisão do mapa precisa ser compatível com a precisão da necessidade do robô para atingir seus objetivos;
- A precisão do mapa e o tipo de dados dos recursos representados precisam ser compatíveis com a precisão e os tipos de dados retornados pelos sensores do robô;
- A complexidade da representação do mapa tem impacto direto com a complexidade computacional.

Existem várias maneiras de representar um mapa: Decomposição por célula, decomposição fixa, decomposição adaptada (com variação de célula), *occupancy grid* e representação topológica etc. [31].

Os mapas comumente conhecidos, que são vistos em guias ou na *internet*, são os mapas métricos, onde as distâncias entre os pontos desejados podem ser medidas com uma régua e aplicando a escala indicada no mapa, se tem a exata distância entre esses pontos. Os mapas topológicos não representam o mapa como um todo, representam apenas pontos de interesse e a conectividade entre esses pontos. Mapas topológicos são representados em forma de grafos, onde os vértices são os pontos que se desejam representar e as arestas indicam sua conectividade, se é possível ir de um ponto à outro, qual a distância (indicada no peso da aresta) e a direção, ou seja, é possível ir do vértice **a** ao vértice **b** e vice-versa. A Figura 3.2 traz exemplos de mapas métrico e topológico.



(a) Mapa Métrico



(b) Mapa Topológico

Figura 3.2: Exemplos de mapas.

### 3.3 Planejamento de Trajetória

O primeiro passo para planejar uma trajetória é transformar um possível modelo contínuo do ambiente em um mapa discreto compatível com o algoritmo de planejamento de trajetória escolhido. É possível identificar três estratégias gerais de composição [31]:

- *Roadmap*: identificar um conjunto de rotas nos espaços livres;
- Decomposição em células: discriminar entre células livres e ocupadas;
- Campos potenciais: impor uma função matemática sobre o espaço.

#### 3.3.1 *Roadmap*

A técnica de *roadmap* para planejamento de trajetórias consiste em capturar a conectividade do espaço livre do ambiente em uma rede de curvas. Essa rede é vista como um conjunto padrão de caminhos. O planejamento da trajetória então se reduz à conectar os pontos inicial e final do robô no *roadmap* e buscar neste um caminho entre esses dois pontos. Se existir um caminho ele será dado pela junção de três subcaminhos: um subcaminho entre o ponto inicial até algum ponto do *roadmap*, um subcaminho do *roadmap* e um subcaminho do *roadmap* até o ponto final [26].

Vários métodos propostos foram baseados nessa idéia, dentre eles: grafos de visibilidade, diagrama de Voronoi, rede de caminho livre e silhueta. Nesta dissertação será utilizado o diagrama de Voronoi.

**Diagrama de Voronoi** : É um método completo de mapa de rotas que tende a maximizar a distância entre o robô e os obstáculos no mapa. Para cada ponto livre no mapa é calculada a distância para o obstáculo mais próximo. O diagrama de Voronoi consiste nos pontos que são equidistantes de um ou mais obstáculos. Um exemplo de diagrama de Voronoi em um mapa pode ser visto na Figura 3.3 [31].

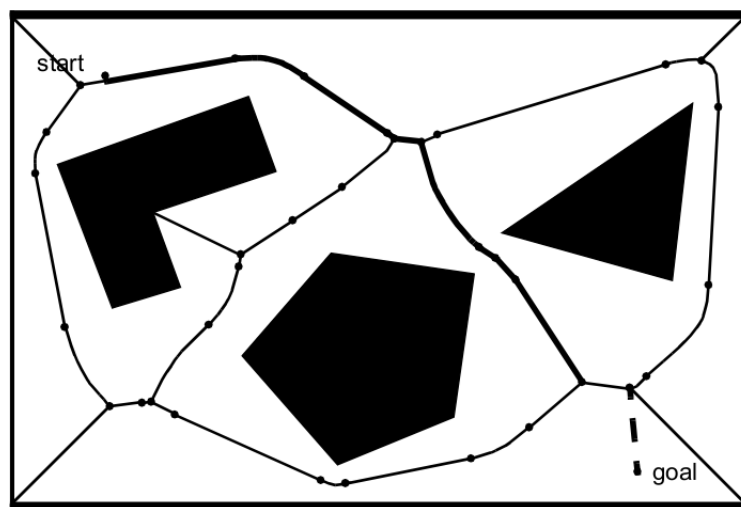


Figura 3.3: Exemplo de um diagrama de Voronoi. [31]

O diagrama de Voronoi tem uma fraqueza importante, sensores de localização com alcance limitado. Como o algoritmo maximiza a distância entre o robô e um objeto no ambiente, qualquer sensor de curto alcance no robô poderá falhar para perceber o mundo ao seu redor. Se o sensor de curto alcance está sendo usado para localização, então, o caminho designado pelo diagrama de Voronoi será pobre no ponto de vista para localização [31].

Por outro lado, como por definição, o caminho é criado baseado em um ponto equidistante dos obstáculos, isso garante um rota segura do robô pelo mapa.

### 3.3.2 Decomposição em Células

: Este método consiste em dividir o espaço livre do mapa em células, de forma que um caminho entre quaisquer duas células possa ser facilmente obtido. Um grafo, chamado

*grafo de conectividade*, representa a relação de adjacência entre as células; onde os vértices representam as células extraídas do espaço livre. Somente existe uma aresta entre dois vértices se, e somente se, as células correspondentes foram adjacentes. O resultado de um caminho é uma seqüência de células denominada *canal*, de onde pode ser computado um caminho contínuo [26]. A Figura 3.4 demonstra um exemplo de mapa utilizando decomposição em células.

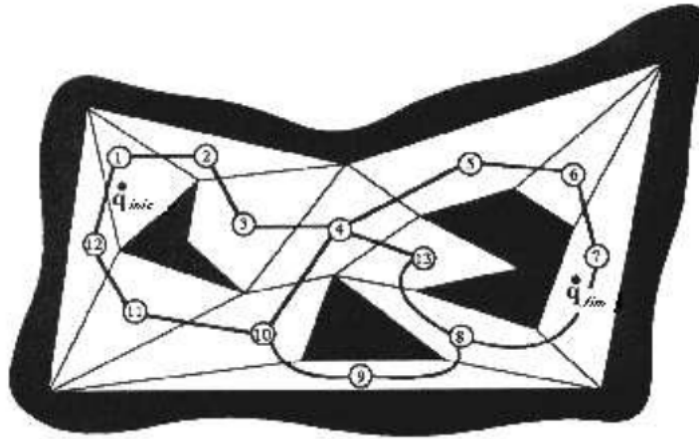


Figura 3.4: Exemplo de um mapa com decomposição em células.

### 3.3.3 Campos Potenciais

: Neste método, o espaço livre é discretizado em uma fina grade, a cada posição é associada uma função com a qual pode-se fazer uma analogia a um campo potencial. Como o tamanho da grade é grande, pois ela é fina, são utilizados métodos heurísticos para encontrar um caminho. A analogia que o método sugere é que o robô seja uma partícula movendo-se sob a influência de um campo potencial gerado pelos obstáculos e pelo seu ponto de destino. O ponto de destino gera um campo potencial que atrai o robô, enquanto os obstáculos geram um campo que repele o robô. O caminho final é dado pela força resultante desses campos potenciais.

Um exemplo de campos potenciais é mostrado na Figura 3.5. O campo potencial atrativo (b) é um parabolóide com ponto de mínimo localizado na posição do objetivo. O campo potencial repulsivo (c) é diferente de zero somente a partir de uma determinada distância dos obstáculos. O caminho (e) é construído pela direção oposta a do gradiente do potencial resultante (d). Em (f) tem-se uma matriz de orientações do vetor gradiente, que são as orientações das forças induzidas pelo campo potencial [26].

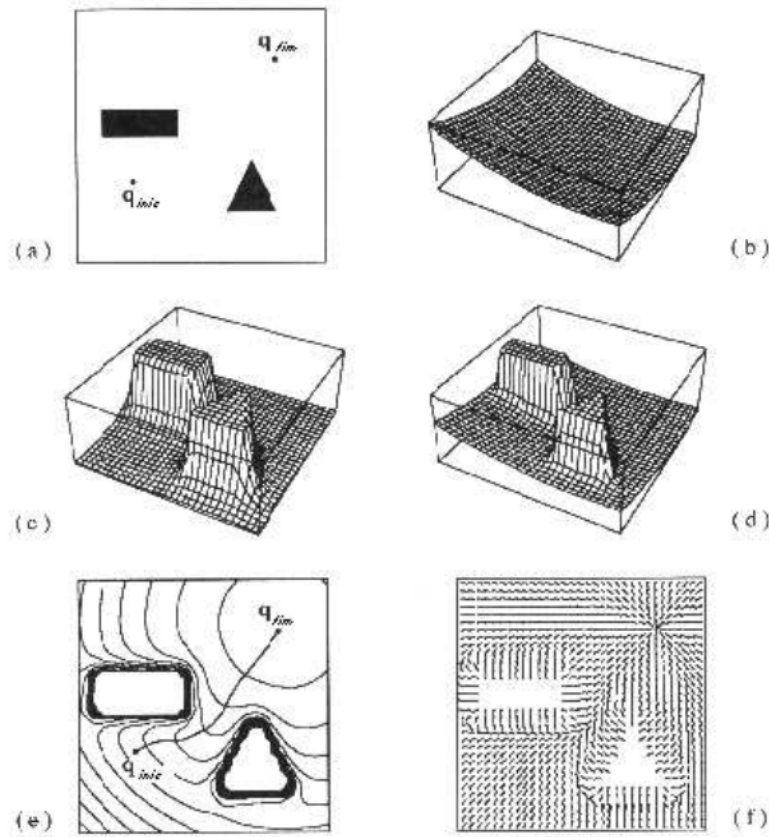


Figura 3.5: Exemplo de um mapa com campos potenciais. [26]

### 3.4 Desvio de Obstáculos

Recentemente, muitas pesquisas voltaram sua atenção para o problema de desvio de obstáculos. Entretanto, existem alguns métodos clássicos de desvio de obstáculos que devem ser citados [5]: Detecção de borda, *certainty grid*, campos potenciais, campo de força virtual e *vector field histogram*.

Detecção de borda é um método bem popular que extrai as bordas verticais do objeto e guia o robô ao redor dessas bordas.

*Certainty grid* é um método de representação probabilístico de obstáculos que modela o mundo em uma grade, onde a área de trabalho do robô é modelada em um arranjo de quadrados em 2D, chamadas de células. Cada célula tem um valor de certeza que indica o grau de confiança de que algum objeto está na área dessa célula.

O método de campos potenciais funciona tanto para planejamento de trajetória quanto para desvio de obstáculos, para isso basta calcular a força potencial resultante em tempo de execução, com isso o robô poderá desviar de obstáculos móveis.

O campo de força virtual (do inglês *Virtual Force Field* - VFF) é um método para veículos que necessitam de uma resposta mais rápida para fazerem curvas. É um método baseado na *certainty grid*, onde uma grade de histograma cartesiano 2D é usado para representar a probabilidade de cada célula conter um obstáculo, depois a idéia de campos potenciais é aplicada ao histograma.

E, por fim, o método de *vector field histogram* - VFH, que cria um mapa de *certainty grid* local e, ao invés de utilizar um histograma cartesiano 2D, utiliza um histograma polar ( $\alpha - P$ ), onde  $\alpha$  é o ângulo do sensor e  $P$  é a probabilidade de haver um obstáculo nessa direção. O VFH é explicado melhor a seguir.

### 3.4.1 *Vector Field Histogram*

Analisando melhor o método VFF percebe-se um problema que é a redução drástica excessiva dos dados quando forças de repulsão individuais do histograma da grade de células são somadas para calcular o vetor resultante. Centenas de pontos de dados são reduzidos em um passo para direção e magnitude. Conseqüentemente, informações detalhadas sobre a distribuição local do obstáculo é perdida. Para evitar essa situação, foi desenvolvido um novo método chamado *Vector Field Histogram* - VFH. O Método VFH utiliza dois estágios de redução de dados [5].

O VFH mantém um mapa métrico probabilístico simplificado baseado em malhas, semelhante ao *Certainty grid*, porém utiliza valores inteiros entre zero e cinco, no lugar de valores reais entre zero e um, como no *Certainty grid* [9].

Outra diferença entre o VFH e o *Certainty grid* é em relação à maneira como o mapa é gerado, pois para conseguir operar com rapidez para desviar de obstáculos em velocidades elevadas, o custo para a manutenção do mapa tem que ser baixo, ou seja, ocupar pouco tempo do processador. Para isso o mapa é obtido através de amostragem rápida, onde cada célula é iniciada em zero e é incrementada em um cada vez que um sensor detectar um obstáculo naquela posição, até que alcance cinco (valor máximo) e não mudará mais [9].

A cada iteração do algoritmo é realizada uma amostragem rápida, criando um histograma polar. Esse histograma é criado de tal forma que as regiões ao redor do robô são divididas em  $k$  setores, contendo cada um sua densidade de ocupação. Esse histograma não é feito no mapa todo, e sim somente em uma região ativa, cujo centro é o robô [9].

Existem três níveis de representação de dados [5]:

- O nível mais alto contém uma descrição detalhada do ambiente do robô;
- No nível intermediário é armazenado um histograma polar unidimensional sobre a localização momentânea do robô;
- O nível mais baixo é a saída do algoritmo VFH, valores de referência para o controle de movimento do robô.

No primeiro estágio da redução de dados é mapeada a grade de histograma do ambiente (Figura 3.6) em um histograma polar (Figura 3.7). E no segundo estágio é calculado o ângulo  $\Omega$  entre o robô e a meta; para isso, escolhe-se o setor  $k$ , referente ao ângulo mais próximo de  $\Omega$ , com a densidade de ocupação menor que uma constante pré-definida. Sendo assim, o ângulo  $\theta$ , referente a esse setor, determina para onde o robô deve virar. E a velocidade linear pode ser calculada com heurísticas que utilizam as densidades de ocupação próximas ao ângulo  $\theta$  [9].

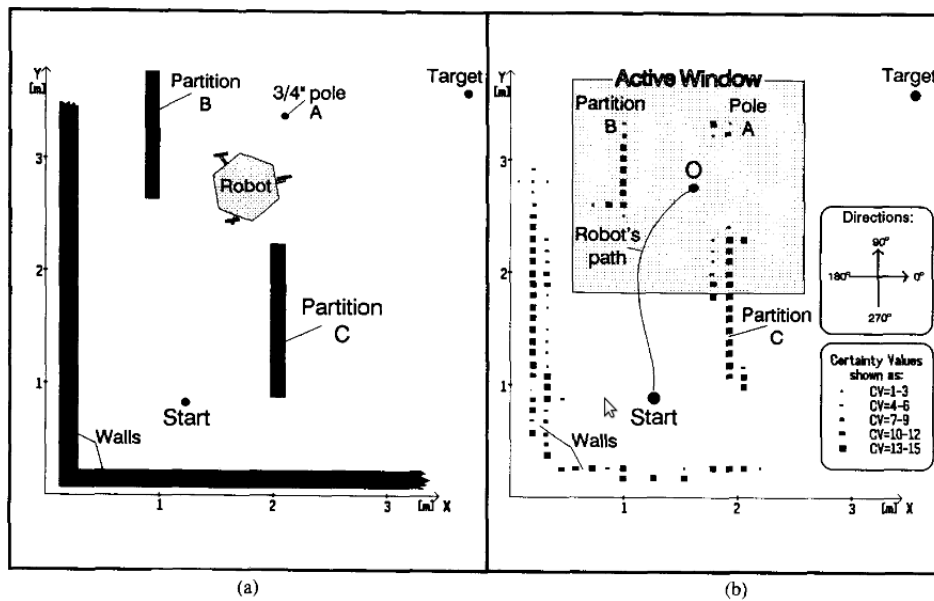


Figura 3.6: (a) Exemplo de um mapa. (b) Grade de histograma correspondente. [5]



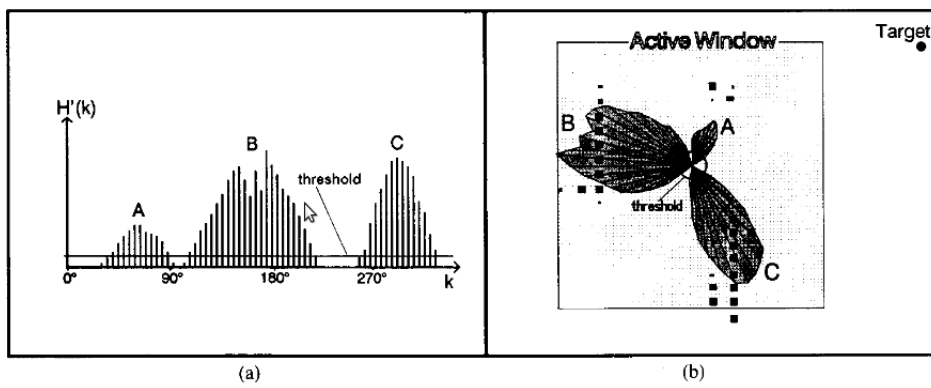


Figura 3.7: (a) Densidade polar de obstáculo em um histograma polar relativo à posição do robô em  $O$  (Figura 3.6(b)). (b) O mesmo histograma polar de (a) mostrado em forma polar e por cima da grade de histograma da Figura 3.6(b). [5]

## **Grafos e Aplicações**

---

Grafos e mapas topológicos, são muito utilizados na literatura para navegação de robôs móveis, como pode ser constatado em [1, 24, 30, 32–34]. Como o problema proposto (seção 5.4) diz respeito à busca de trajetória em um mapa topológico (grafo), uma das soluções se torna uma variação do problema do caixeiro viajante que trata, basicamente, de encontrar o menor ciclo hamiltoniano em um grafo.

As seções seguintes contém uma explicação sobre grafos, mapas topológicos, ciclo hamiltoniano e o problema do caixeiro viajante.

### **4.1 Grafos**

Muitas aplicações em computação necessitam considerar um conjunto de conexões entre objetos. Os relacionamentos dessas conexões podem ser utilizados para responder questões como: Existe caminho de um objeto a outro? Quantos objetos podem ser alcançados a partir de um determinado objeto? Qual a menor distância entre dois objetos? Existe um tipo abstrato de dados chamado grafo que é usado para modelar essas situações [38].

Um grafo é constituído de um conjunto de vértices e um conjunto de arestas que conectam pares de vértices. Um vértice é um objeto que pode conter nomes e outros atributos. Os grafos podem ser direcionados ou não direcionados. Um grafo direcionado  $G$  é um par  $(V, A)$ , em que  $V$  é um conjunto finito de vértices e  $A$  é um conjunto de arestas com uma relação binária. A Figura 4.1(a) mostra um grafo direcionado com o conjunto de vértices  $V = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  e de arestas  $A = (0, 1), (0, 3), (1, 2), (1, 3), (2, 2), (2, 3), (3, 0), (5, 4)$ . Em um grafo não direcionado as arestas  $(u, v)$  e  $(v, u)$  são consideradas as mesmas. A Figura 4.1(b) mostra um grafo não direcionado com o conjuntos de vértices  $V = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  e de arestas  $A = (0, 1), (0, 2), (1, 2), (4, 5)$ . Em grafos direcionados podem existir arestas de um vértice para ele mesmo, chamadas de *self-loops*, como a aresta  $(2, 2)$  no grafo direcionado da Figura 4.1(a) [38].

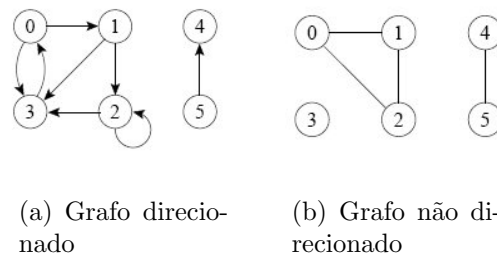


Figura 4.1: Exemplo de grafos [38]

Em um grafo direcionado, a aresta  $(u, v)$  sai do vértice  $u$  e entra no vértice  $v$ . Se  $(u, v)$  é uma aresta do grafo  $G = (V, A)$ , então o vértice  $v$  é adjacente ao vértice  $u$ . Quando o grafo não é direcionado, a relação de adjacência é simétrica [38].

Em um grafo, um caminho  $(v_0, v_1, \dots, v_k)$  forma um ciclo se  $v_0 = v_k$  e o caminho contém pelo menos uma aresta. O ciclo é simples se os vértices  $v_1, v_2, \dots, v_k$  são distintos. O *self-loop* é um ciclo de tamanho 1. Na Figura 4.1(a), o caminho  $(0, 1, 2, 3, 0)$  forma um ciclo. Dois caminhos  $(v_0, v_1, \dots, v_k)$  e  $(v'_0, v'_1, \dots, v'_k)$  formam o mesmo ciclo se existir um inteiro  $j$  tal que  $v'_i = v_{(j+i) \bmod k}$  para  $i = 0, 1, \dots, k - 1$ . Na Figura 4.1(a), o caminho  $(0, 1, 3, 0)$  forma o mesmo ciclo que os caminhos  $(1, 3, 0, 1)$  e  $(3, 0, 1, 3)$ . Um grafo sem ciclos é um grafo acíclico [38].

Um grafo  $G$  é definido como *Hamiltoniano* se possui um ciclo contendo todos os vértices de  $G$ . Esse nome foi dado, porque, em 1856, Willian Rowan Hamilton inventou um jogo matemático que consistia em um dodecaedro no qual cada um dos vinte vértices recebeu o nome de uma cidade. O objetivo do jogo era viajar pelas arestas do dodecaedro, visitando cada cidade exatamente uma vez e retornando para o ponto inicial [4]. A Figura 4.2 mostra uma solução para o jogo.

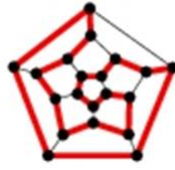


Figura 4.2: Dodecaedro de Hamilton. [4]

Definições segundo Gondran, Minoux e Vajda [14]:

- Um caminho passando somente uma vez em cada vértice de  $G$  é chamado Caminho Hamiltoniano e tem comprimento de  $N - 1$
- Um ciclo Hamiltoniano é um ciclo que passa somente uma vez em cada vértice de  $G$  e tem comprimento  $N$ .

Um grafo não direcionado é conectado se cada par de vértices está conectado por um caminho. Um grafo direcionado é fortemente conectado se cada dois vértices quaisquer são alcançáveis a partir um do outro. Um grafo ponderado possui pesos associados às suas arestas. Esses pesos podem representar, por exemplo, custos ou distâncias. Um grafo completo é um grafo no qual todos os pares de vértices são adjacentes [38].

## 4.2 Busca do Menor Caminho

### 4.2.1 Algoritmo de Dijkstra

Existem diversos algoritmos para buscas em grafo na literatura [8]. Neste trabalho foi utilizado o algoritmo de Dijkstra. O algoritmo de Dijkstra utiliza a técnica do relaxamento, que nada mais é que verificar se é possível melhorar o caminho obtido até o momento passando por um vértice diferente. O algoritmo de Dijkstra apresenta uma solução  $O([m + n] \times \log(n))$  para a determinação do menor caminho [10], e é composto por três passos:

- Passo 1: Iniciar os valores:
  - para cada**  $v \in V[G]$  **faça**
  - $d[v] \leftarrow \infty$
  - $\pi[v] \leftarrow \text{nulo}$

**fim-para**

$d[s] \leftarrow 0$

$V[G]$  é o conjunto de vértices  $v$  que forma o grafo  $G$ .

$d[v]$  é o vetor de distâncias do vértice  $s$  até cada vértice  $v$ .

$\pi[v]$  identifica o vértice de onde se origina uma conexão até  $v$  de maneira a formar um caminho mínimo;

- Passo 2: Tem-se que usar dois conjuntos:  $S$ , que representa todos os vértices  $v$  onde  $d[v]$  já contém o custo do menor caminho e  $Q$  que contém os vértices restantes;
- Passo 3: Realiza-se uma série de relaxamentos das arestas:

**enquanto**  $Q \neq \emptyset$  **faça**

$u \leftarrow \text{extraia-mín}(Q)$

$S \leftarrow S \cup u$

**para cada**  $v$  adjacente a  $u$  **faça**

se  $d[v] > d[u] + w(u, v)$  então

$d[v] \leftarrow d[u] + w(u, v)$

$\pi[v] \leftarrow u$

**fim-para**

**fim-enquanto**

$w(u, v)$  é o peso da aresta que vai de  $u$  a  $v$ .  $u$  e  $v$  são vértices quaisquer e  $s$  é o vértice inicial.  $\text{extraia-mín}(Q)$ , retorna o menor elemento.

### 4.3 Caixeiro-Viajante

O problema do caixeiro-viajante envolve um conjunto de cidades e é da classe de problemas de roteamento de nós, onde um caixeiro sai de uma cidade base, visita todas as cidades somente uma vez, e retorna à cidade base, otimizando um ou mais objetivos. Problemas de caixeiro-viajante são definidos em grafos orientados ou não orientados [3].

A definição do problema do caixeiro-viajante é: Considera-se um grafo não orientado  $G = (N, E)$ , em que o conjunto  $N$  consistem em  $n$  cidades e  $E$  representa o conjunto de arestas entre essas cidades. Supondo que  $G$  é um grafo completo, isto é, para qualquer par de cidades  $i, j \in N, i \neq j$ , existe uma aresta  $(i, j)$ . A distância entre as cidades  $i$ , e  $j$  é  $c_{ij}$ , e quando  $c_{ij} = c_{ji}$ , o problema é dito simétrico. Um caixeiro deve visitar  $n$  cidades,

passando por cada cidade somente uma vez, e retornar à cidade de partida. Esse percurso é denominado ciclo Hamiltoniano do grafo  $G$ , e o problema consiste em determinar o ciclo Hamiltoniano, ou rota, de distância mínima. Devido à sua aplicação em diversas áreas, este é um dos problemas combinatórios mais pesquisados [3].

Define-se as variáveis

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o caixeiro vai diretamente da cidade } i \text{ à cidade } j, i \neq j \\ 0 & \text{se o caixeiro não vai da cidade } i \text{ à cidade } j, i \neq j \end{cases}$$

E considera-se o seguinte modelo:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j>i} c_{ij} x_{ij} \quad (4.1)$$

$$\sum_{j<i} x_{ji} + \sum_{j>i} x_{ij} = 2, i = 1, \dots, n \quad (4.2)$$

$$x \in B^{n(n-1)/2} \quad (4.3)$$

A função objetivo (4.1) expressa a minimização da distância total da rota, e a restrição (4.2) impõe que cada cidade tenha somente uma cidade sucessora imediata e uma cidade predecessora imediata, ou seja, é visitada uma única vez. Uma solução para o modelo anterior pode gerar sub-rotas desconexas (Figura 4.3) [3].

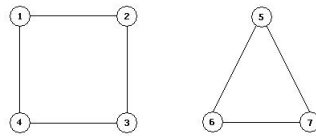


Figura 4.3: Exemplo de possíveis sub-rotas. [3]

Seja  $S$  uma sub-rote, por exemplo,  $S = 1.2.3.4$  na Figura 4.3. A eliminação de sub-rotas pode ser obtida através da restrição:

$$\sum_{i \in S} \sum_{i \in S, j>i} x_{ij} \leq |S| - 1, S \subset \mathbb{N}, 3 \leq |S| \leq \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor \quad (4.4)$$

Que garante que, para cada conjunto  $S$ , existem no mínimo duas arestas que entram e/ou saem de  $S$ , ou seja, existem no mínimo duas arestas entre cidades de  $S$  e cidades fora de

$S$ . A cardinalidade de  $S$  é no mínimo 3 (pois ciclo em um grafo não orientado tem pelo menos 3 vértices) e no máximo  $\lfloor \frac{n}{2} \rfloor$ , pois ao se eliminar ciclos com  $k$  vértices, elimina-se ciclos com  $n - k$  vértices. A sub-rotas  $S = 1, 2, 3, 4$  é eliminada.

$$x_{15} + x_{16} + x_{17} + x_{25} + x_{26} + x_{27} + x_{35} + x_{36} + x_{37} + x_{45} + x_{46} + x_{47} \geq 2$$

Como o número de subconjuntos distintos de um conjunto de cardinalidade  $k$  é  $2^k$ , a restrição 4.4 têm cardinalidade da ordem de  $2^k$ ,  $k \geq 6$ , ou seja, o crescimento é exponencial em função do número de cidades. Para  $k \leq 5$ , a restrição 4.2 elimina sub-rotas [3].

## 4.4 Considerações

Como o mapa que é utilizado no projeto é um mapa baseado em grafo (mapa topológico), é possível utilizar algumas teorias de grafos presentes na literatura como base para se achar uma solução para o problema. Assim como, foi utilizado o algoritmo de Dijkstra nas buscas de menor caminho para o robô fazer a menor trajetória de um vértice a outro, e a fundamentação matemática da teoria do caixeiro-viajante que foi utilizada como base para se achar uma solução *offline*.

## Resultados Obtidos

---

Esta dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de uma estratégia eficiente para determinar uma seqüência de áreas a serem visitadas em ambientes internos com a finalidade de monitoramento destes ambientes utilizando um robô móvel. O problema a ser resolvido consiste na divisão de um ambiente previamente conhecido em áreas de interesse (exemplo na Figura 5.1). A cada uma dessas áreas é atribuído um valor (peso) referente à sua importância de monitoramento (exemplo na Tabela 5). A prioridade com que o robô deve visitar determinadas áreas é calculada com base na importância dessas áreas e no tempo decorrido desde a sua última visita. Áreas de maior importância devem ser visitadas mais freqüentemente.

### 5.1 Critérios de Avaliação

Os algoritmos e estratégias serão então testados e avaliados. As avaliações consistem na comparação dos algoritmos e estratégias. Serão utilizados dois critérios de comparação, um critério comparando a freqüência relativa de cada sala com sua prioridade relativa, onde o melhor resultado é aquele em que a freqüência relativa se aproximar mais da prioridade relativa, pois se uma sala (a) possui uma prioridade com valor duas



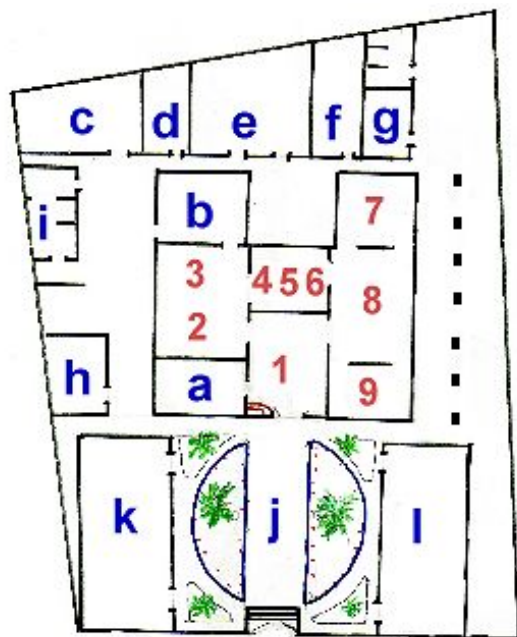


Figura 5.1: Exemplo de mapa: Museu do homem sergipano e suas divisões

Tabela 5.1: Exemplo de prioridades

Sala	Prioridade
a	5
b	5
c	2
d	1
e	3
f	2
g	1
h	2
i	2
j	4
k	4
l	4
1	2
2	3
3	3
4	5
5	5
6	5
7	4
8	4
9	3

vezes maior que uma sala (b) (Salas f e 7 na Figura 5 por exemplo), a sala (a) deve ser visitada com o dobro de frequência do que a sala (b). Esse cálculo é feito somando as diferenças quadráticas entre a prioridade relativa e a frequência relativa de cada sala ( $\sum_{i=0}^n (P_i/P_t - F_i/F_t)^2$ ). Isto indica que o algoritmo ou estratégia se manteve fiel à definição do problema: *Áreas de maior importância devem ser visitadas mais frequentemente.*

O segundo critério é um gráfico mostrando a progressão da somatória dos graus de urgência de todas as salas ( $\sum_{i=0}^n U_i$ ), no qual o melhor resultado consiste em manter o menor valor da somatória dos graus de urgência; mostrando que o algoritmo ou estratégia levou o robô às salas com maior eficiência. O grau de urgência  $U$  é calculado multiplicando-se a prioridade relativa da sala  $P/P_t$  pelo tempo decorrido desde a última visita  $t$  ( $U_i = P_i/P_t \times t_i$ ). A casa visita o  $t$  é zerado.

## 5.2 Metodologia

Para a solução do problema descrito, o robô tem uma descrição completa do ambiente em que atua (mapa). Foram utilizados somente dois sensores: Odômetro para localizar o robô no mapa e o LASER para o desvio de obstáculos. O controle do robô foi desenvolvido utilizando a biblioteca Player/Stage. Para desvio de obstáculos utilizou-se a técnica VFH que já vem implementada no Player e se mostrou suficiente para o projeto.

Cada ambiente tem um mapa topológico. O robô deve utilizar esse mapa para se locomover de uma sala para outra no ambiente. Para os algoritmos e estratégias determinarem a sequência de salas a serem visitadas, é considerado um grafo completo com todas as salas, pois para determinar o melhor caminho entre uma sala e outra será utilizado o algoritmo de Dijkstra no mapa topológico.

Como um dos critérios de avaliação está relacionado ao tempo que o robô fica sem visitar as salas é possível deduzir que a solução seja um ciclo.

Considera-se:

- Um ambiente com  $S$  salas;
- Um ciclo hamiltoniano  $C$  qualquer;
- $C_i$  é a  $i$ -ésima sala visitada no ciclo;

- Uma velocidade constante do robô (tanto linear quanto angular);
- $\Delta t_i$  o tempo para sair da sala  $i$  e chegar na sala  $i + 1$ .

Como o tempo de viagem entre as mesmas salas é constante todos os  $\Delta t_i$  são constantes, portanto o tempo total do ciclo  $T$  é constante ( $\sum_{i=1}^S \Delta t_i = cte$ ). Se o tempo do ciclo é constante, o tempo que o robô demora para visitar cada sala é constante igual a  $T$ . Mas isso não é interessante para solução do problema pois o grau de urgência de cada sala é diferente, então se uma sala tem uma prioridade muito alta, seu grau de urgência vai ser muito alto até o robô revisita-la.

Para resolver esse problema, basta fazer com que o robô revise essa(s) sala(s) mais de uma vez no ciclo. Então supondo um ciclo de tamanho  $n$  sendo  $n \geq S$  o tempo total do ciclo continua constante ( $\sum_{i=1}^n \Delta t_i = cte$ ). Portanto a solução do problema consiste em encontrar esse ciclo.

## 5.3 Soluções

Foram definidos dois tipos de soluções: uma solução **offline**, ou seja, a solução é calculada em um computador e depois informada ao robô qual seqüência de sala ele deve seguir, essa seqüência não é alterada. E a outra é uma solução **tempo real**, ou seja, o robô define para qual sala deve ir durante a execução do algoritmo, baseando suas decisões no que está acontecendo no momento. A solução **offline** é dividida em duas partes: **Gerador**, que cria possíveis seqüências de salas ótimas, e o **Avaliador** que analisa e computa uma nota para as seqüências de salas criadas pelo **Gerador**

### 5.3.1 Offline

Esse método consiste em explorar as diversas possíveis combinações de seqüências de salas para encontrar a seqüência ótima. Um programa chamado **gerador**, seguindo uma determinada heurística, gera as possíveis seqüências de salas, essas seqüências são fornecidas ao programa **avaliador** que, baseado no critério de maior Grau de Urgência Total, analisa a seqüência e retorna uma avaliação ao **gerador** que tomará a decisão de: descartar a seqüência, preservar a seqüência para gerar futuras seqüências ou guardar a seqüência como possível seqüência ótima.

#### 5.3.1.1 Gerador

O programa chamado **gerador** é utilizado para gerar os candidatos à sequência de salas ótima do mapa analisado. Esses candidatos são avaliados pelo programa **avaliador** e de acordo com a avaliação o **gerador** irá guardar a sequência como possível ótima, descartar ou continuar utilizando essa sequência para gerar novas sequências.

O programa **gerador** utiliza uma classe (tipo de variável) chamada *Agente* contendo os seguintes atributos:

- **vertice**: Vértice no qual o agente se encontra no momento;
- **caminho**: Vetor de salas que guarda a sequência de salas que o agente percorreu até chegar no vértice atual;
- **avaliacao**: Avaliação da sequência de salas do agente;
- **tempo**: Tempo em segundos que o robô levou para percorrer a sequência de salas até o vértice atual.

O **gerador** recebe apenas um parâmetro como entrada: o nome do mapa que quer achar a sequência ótima. O programa inicia criando uma sequência percorrendo as salas na ordem numérica (Sala 1, sala 2..) e classificada como possível ótima. A seguir o programa cria um *Agente* em cada sala do mapa para explorar as possibilidades do robô começar em cada sala, esses *agentes* são organizados em uma fila de candidatos.

O laço principal do programa consiste em retirar um *agente* da fila e para cada sala *i* é criado um novo *agente*, simulando que o *agente* retirado da fila navegou até a sala *i*. Em cada novo *agente* é atualizada a sequência de salas visitadas e o agente é reavaliado. Se a avaliação for um valor negativo o *agente* é inserido na fila de *agentes*. Se o valor retornado for 0 (zero) o *agente* é descartado. Caso o avaliador retorne um valor positivo e esse valor é menor que a avaliação da atual sequência ótima, o novo *agente* contendo a sequência melhor é guardado como possível sequência ótima. Como o algoritmo somente insere na fila os *agentes* que podem gerar sequências ótimas, o critério de parada é quando não existe mais *agentes* na fila, o programa então retorna o *agente* com a sequência ótima.

A Figura 5.2 mostra o fluxograma do programa **gerador** e o algoritmo 5.3.1 contém seu pseudocódigo.

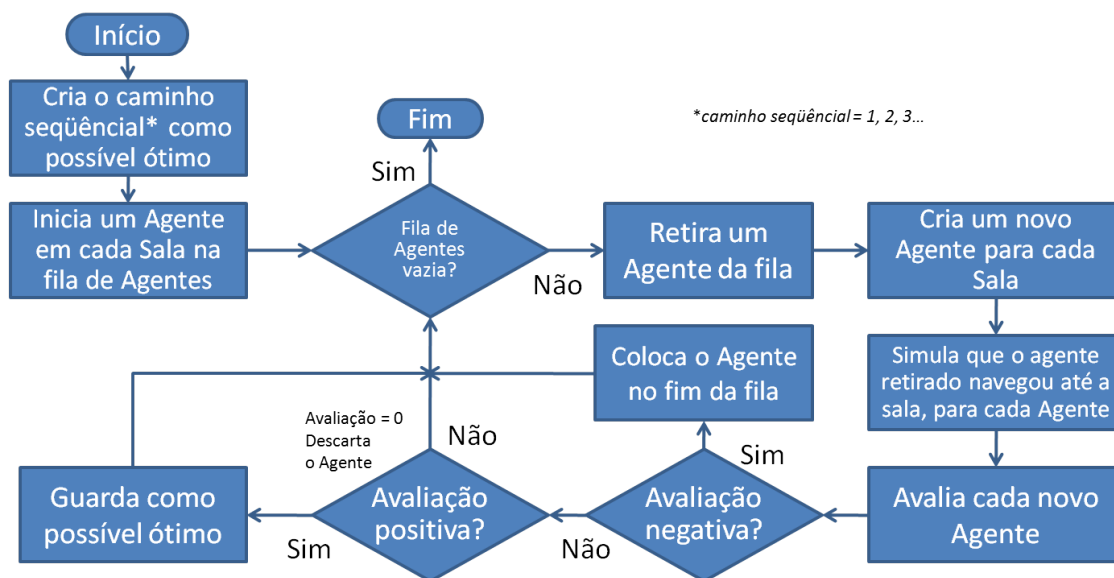


Figura 5.2: Fluxograma do geradpr

---

**Algoritmo 5.3.1** gerador

---

**Entrada:** mapa**Saída:** *melhor\_agente*

```
1: agente_otimo.vertice  $\leftarrow$  1
2: agente_otimo.caminho  $\leftarrow$  1, 2, 3...
3: agente_otimo.avaliacao  $\leftarrow$  avaliar(agente_otimo)
4: para cada sala s do mapa faça
5:   Inicia agente na sala s
6:   Adiciona agente na fila
7: fim-para
8: repita
9:   Retira o agente do topo da fila
10:  para cada sala s do mapa faça
11:    novo_agente  $\leftarrow$  agente
12:    Atualiza o vértice do agente com a sala s
13:    Adiciona a sala s ao caminho do novo_agente
14:    Avalia o novo_agente como o caminho atual
15:    se A avaliação for negativa então
16:      {novo_agente não visitou todas as salas ou não é um loop}
17:      Adiciona o novo_agente no fim da fila
18:    fim-se
19:    se A avaliação for positiva então
20:      {novo_agente é melhor que o ótimo atual}
21:      agente_otimo  $\leftarrow$  novo_agente {Atualiza o agente_otimo com o novo_agente}
22:    fim-se
23:  fim-para
24: até que Não exista agente na fila
25: retornar agente_otimo
```

---

A seguir, uma explicação mais detalhada de como o *gerador* cria as possíveis seqüências de salas para serem avaliadas. Será usado como exemplo um ambiente com quatro salas. Independente do mapa topológico, o gerador trabalha utilizando um grafo completo contendo somente as salas (Figura 5.3).

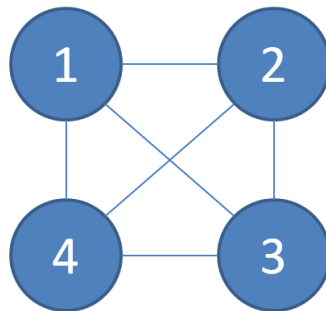


Figura 5.3: Grafo completo das salas.

O *gerador* então cria um *agente* em cada sala como mostra a Figura 5.4.

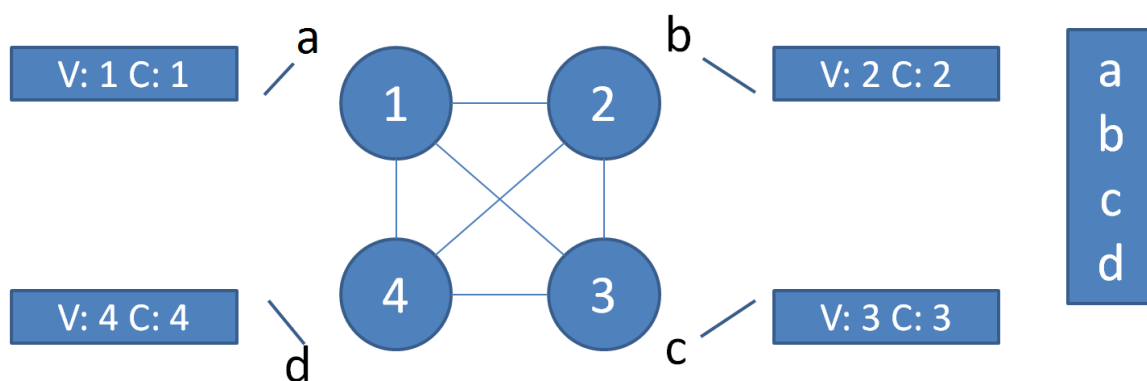


Figura 5.4: Um agente em cada sala, e a fila de *agentes*.

Seguindo o laço principal, o *gerador* remove o primeiro *agente* da fila, no caso é o *agente a* (Figura 5.5).

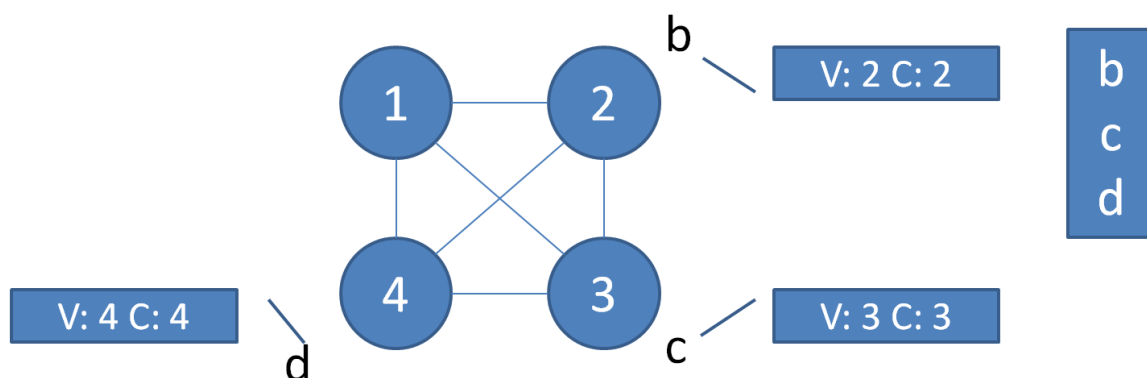


Figura 5.5: Removendo o *agente a*.

Em seguida o **gerador** cria uma cópia do *agente a* para cada sala, e simula que esses *agentes* navegaram até sua sala correspondente (Figura 5.6). Atualizando o caminho que esse agente percorreu para chegar a essa sala e a avaliação desse caminho.

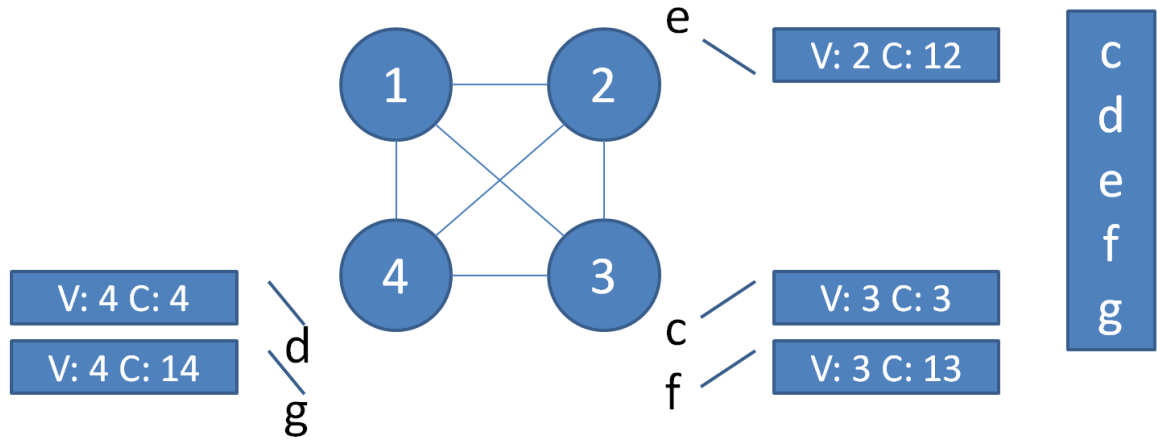


Figura 5.6: Inserindo os *agentes e, f e g*.

Após feito isso o **gerador** recomeça o ciclo, removendo o primeiro *agente* da fila (no caso *agente b*), criando outros *agentes* e inserindo-os na fila de acordo com a avaliação adquirida (*agentes h, i e j*) como mostra a Figura 5.7.

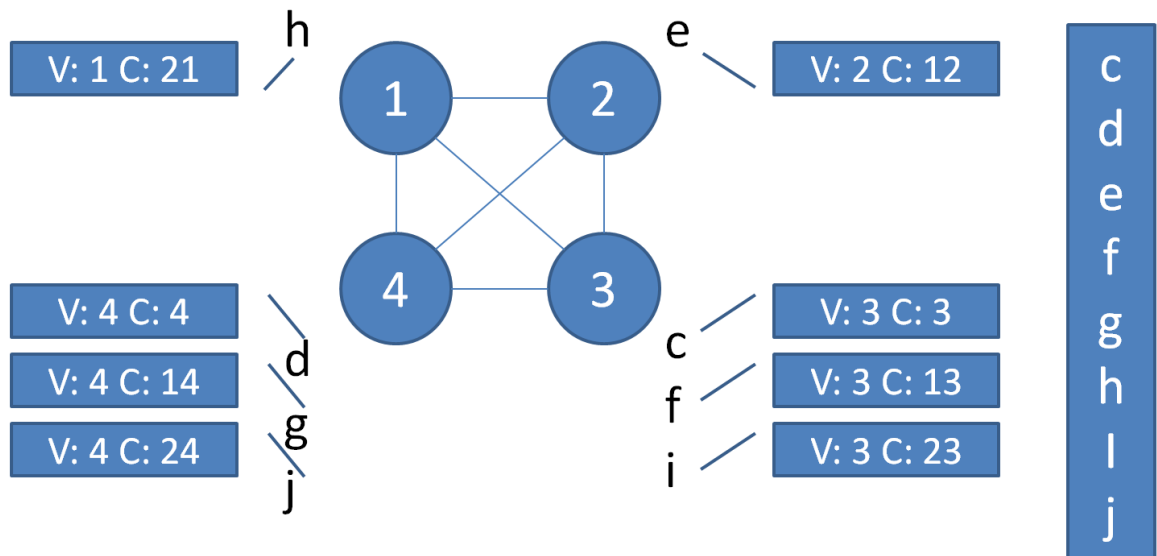


Figura 5.7: Removendo o *agente b* e inserindo os *agentes h, i e j*.

### 5.3.1.2 Avaliador

O programa chamado **avaliador** é utilizado para avaliar os candidatos a sequência de salas ótima do mapa analisado gerado pelo programa **gerador** (Seção 5.3.1.1) e retorna para o **gerador** um valor numérico. Baseado nesse valor o **gerador** irá guardar



a sequência como possível ótima, descartar ou continuar utilizando essa sequência para gerar novas sequência.

O **avaliador** recebe três parâmetros como entrada:

- O nome do mapa onde o caminho será avaliado;
- Um vetor de vértices, representando a sequência de salas a ser avaliada;
- Um valor opcional de limite para a avaliação.

Com esses parâmetros o **avaliador** inicia a simulação do robô navegando pelo mapa. A velocidade linear, que determina a velocidade com que o robô anda para frente ou para trás, é definida pela constante **SIMULACAO\_VEL** como 1 m/s. A velocidade angular, que determina a velocidade com que o robô vira, é definida pela constante **SIMULACAO\_ROT** como 0,5 rad/s. Ambas constantes estão no arquivo **robo.h**. O tempo que o robô demora para visitar uma sala é definido pela constante **VISITAR\_SALA** como 5 s no arquivo **salas.h**. Todos esses valores foram definidos arbitrariamente.

Durante a simulação, a cada visita de sala o **avaliador** mede o Grau de Urgência Total e salva o maior valor, esse valor vai ser a avaliação do caminho neste mapa. Após a simulação o **avaliador** verifica se a avaliação do caminho for maior que o limite fornecido o valor 0 (zero) é retornado, se nenhum limite for fornecido o **avaliador** utiliza o valor do maior inteiro do compilador. Se o caminho não visita todas as salas o **avaliador** retorna a avaliação com valor negativo, se todas as salas foram visitadas o **avaliador** verifica se o caminho é um *loop*, ou seja, se o caminho começa e termina no mesmo vértice, caso contrário ele também retorna a avaliação em valor negativo. Se o caminho for um *loop*, visita todas as salas e o valor da avaliação for menor que o limite fornecido (ou menor que o maior inteiro do compilador), o valor da avaliação, maior Grau de Urgência Total em todo o percurso, é retornado pelo **avaliador**.

Para critério de parada o **avaliador** compara o estado das salas, ou seja, se para cada sala, o Grau de Urgência e o número de visitas é o mesmo ao término do caminho.

A Figura 5.8 mostra o fluxograma do programa **avaliador** e o algoritmo 5.3.2 contém seu pseudocódigo.

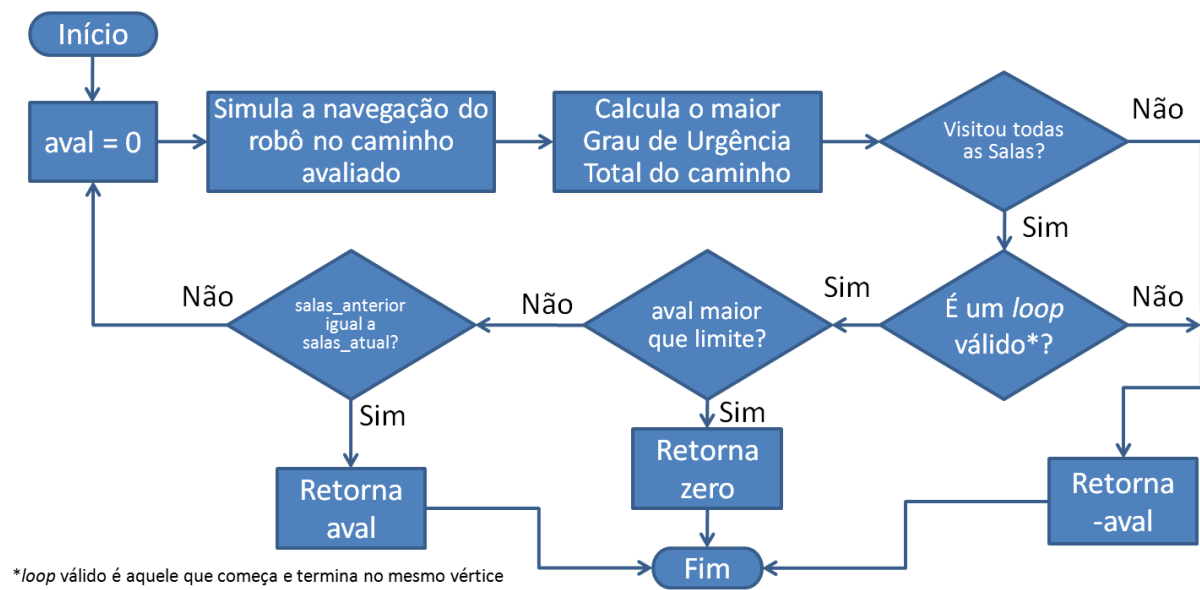


Figura 5.8: Fluxograma do avaliador

**Algoritmo 5.3.2** avaliador**Entrada:** mapa, caminho, limite = INT\_MAX**Saída:** A avaliação do *caminho* no *mapa*

```

1: carregar (mapa)
2: aval ← 0
3: repita
4:   salas_anterior ← salas_atual
5:   para cada vértice v em caminho faça
6:     Calcula o tempo necessário para o robô chegar ao vértice v
7:     Soma a esse tempo o tempo para visitar a sala do vértice v
8:     Atualiza os Graus de Urgência das salas com o tempo calculado
9:     se Grau de Urgência atual > maior então
10:      maior ← Grau de Urgência atual
11:   fim-se
12:   Visita a sala do vértice v
13: fim-para
14: se aval > limite então
15:   retornar 0
16: fim-se
17: se Caminho não visita todas as salas do mapa então
18:   retornar -aval
19: fim-se
20: se Primeiro vértice do caminho diferente do último vértice do caminho então
21:   {Ou seja, não é considerado um loop}
22:   retornar -aval
23: fim-se
24: até que salas_anterior = salas_atual
25: retornar aval

```

### 5.3.2 Tempo Real

A solução em tempo real inicia as prioridades de todas as salas em zero, cada sala recebe um valor correspondente à chance dessa sala gerar uma emergência, como uma lixeira cheia por exemplo. A cada emergência gerada a prioridade da sala é acrescida de uma unidade. O robô segue o paradigma de ir à sala de maior grau de urgência, visita a sala e procura a próxima sala de maior grau de urgência.

A chance de emergência que cada sala recebe é proporcional às prioridades, para fazer o cálculo basta dividir a prioridade da sala pela soma das prioridades do mapa.

$$p_s = \frac{P_s}{\sum_{i=1}^{TotalSalas} P_i} \quad (5.1)$$

Isso faz com que a soma das chances seja igual a um. Por exemplo, se em um mapa de quatro salas as prioridades forem:

Tabela 5.2: Exemplo de prioridades

Sala	Prioridade
1	5
2	1
3	4
4	5

Suas chances de gerar uma emergência ficaram da seguinte forma:

Tabela 5.3: Exemplo de chances de emergência

Sala	Chance
1	0,333
2	0,067
3	0,267
4	0,333

## 5.4 Resultados

Para a solução em Tempo Real, por se tratar de uma solução baseada em números aleatórios, foram executados 100 repetições em cada mapa.

Tabela 5.4: Mapas para testes

Designação	N# de Salas	Prioridades
Quatro	4	Iguais
Quatro Diff	4	Diferentes
X	5	Diferentes
X Incompleto	5	Diferentes
Espinha	6	Iguais
Espinha Diff	6	Diferentes
Apartamento	8	Diferentes

Para os testes foram criados sete mapas, cada qual com uma peculiaridade diferente como mostra a tabela 5.4

Na sequência são mostrados os resultados em cada mapa:

- Quatro: Com quatro salas de prioridades iguais (Tabela 5.5) e ligação entre todas as salas (Figura 5.9):

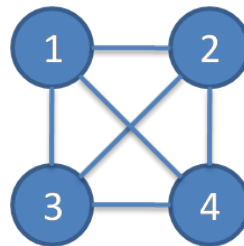


Figura 5.9: Grafo do Mapa Quatro.

Tabela 5.5: Prioridades do Mapa Quatro.

Sala	Prioridade
1	1
2	1
3	1
4	1

A sequência de salas a serem visitadas gerada pelo **gerador** foi: 1 2 4 3.

As prioridades relativas finais da solução em Tempo Real foram próximas às prioridades relativas iniciais do mapa, como mostra a Tabela 5.6.

A Tabela 5.7 mostra que as frequências relativas tanto da solução *Offline* quanto da solução em Tempo Real foram próximas às prioridades relativas iniciais do mapa. A tabela mostra também que a solução *Offline* foi melhor que a solução em Tempo Real através da diferença quadrática.

O gráfico (Figura 5.10) mostra que a solução em Tempo Real depois de estabilizar teve um desempenho inferior à solução *Offline*.

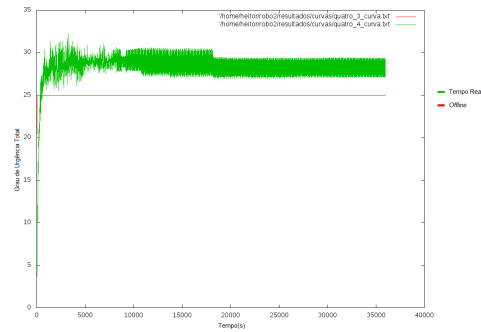


Figura 5.10: Gráfico do Mapa Quatro.

Como o Mapa Quatro é relativamente pequeno (dois metros quadrados) e a sequência gerada pela solução *Offline* é visitar as salas no sentido anti-horário, o robô leva exatamente o mesmo tempo para ir de uma sala à outra. Como as prioridades iniciais do mapa são todas iguais e para gerar o gráfico foram tiradas medidas (Grau de Urgência Total) de dez em dez segundos, coincidiu de o robô a cada dez segundos estar no mesmo lugar no mapa, por isso o gráfico do Mapa Quatro para a solução *Offline* é uma linha.

- Quatro Diff: Com quatro salas com prioridades diferentes (Tabela 5.8) e ligação entre todas as salas (Figura 5.9):

A sequência de salas a serem visitadas gerada pelo **gerador** foi: 1 3 4 2 4 3.

As prioridades relativas finais da solução em Tempo Real foram próximas às prioridades relativas iniciais do mapa, como mostra a Tabela 5.9.

A Tabela 5.10 mostra as frequências relativas das soluções *Offline* e em Tempo Real. Nota-se que as frequências relativas das salas 1 e 2 da solução *Offline* são aproximadamente o dobro das suas respectivas prioridades relativas iniciais do mapa, porém, em números absolutos, é uma diferença de aproximadamente 0,08. E as frequências relativas da solução em Tempo Real são próximas às suas respectivas prioridades relativas iniciais do mapa. A tabela mostra também que a solução em Tempo Real foi melhor que a solução *Offline* através da diferença quadrática.

Tabela 5.6: Prioridades relativas do Mapa Quatro.

Sala	<i>Offline</i>	Tempo Real
1	0,25	0,24989
2	0,25	0,24860
3	0,25	0,25224
4	0,25	0,24927

Tabela 5.7: Frequências Relativas do Mapa Quatro.

Sala	Prioridade Rel.	<i>Offline</i>		Tempo Real	
		Freq.	Freq. Rel.	Freq.	Freq. Rel.
1	0,25	901	0,25021	771,31	0,25114
2	0,25	900	0,24993	775,88	0,25263
3	0,25	900	0,24993	764,04	0,24877
4	0,25	900	0,24993	760,02	0,24746
Diferença Quadrática		0,00000		0,00002	

O gráfico do Mapa Quatro Diff (Figura 5.11), diferentemente do gráfico do Mapa Quatro (Figura 5.10), ilustra que a solução *Offline* manteve o Grau de Urgência Total dentro de uma faixa, entre dez e trinta aproximadamente, mas seu desempenho também foi superior à solução em Tempo Real.

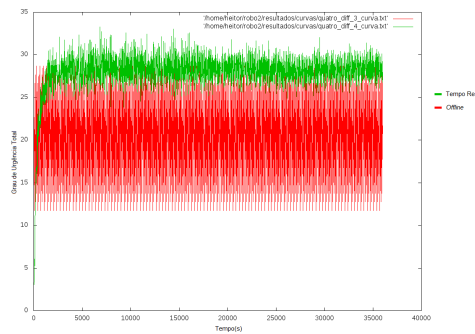


Figura 5.11: Gráfico do Mapa Quatro Diff.

- X: Com cinco salas que formam um X (Prioridades na Tabela 5.11) com ligações entre as salas das pontas (Figura 5.12):

A sequência de salas a serem visitadas gerada pelo gerador foi: 1 2 4 5 3 2 4 5 3.

As prioridades relativas finais da solução em Tempo Real foram próximas às prioridades relativas iniciais do mapa, como mostra a Tabela 5.12.

A Tabela 5.13 mostra que frequência relativa da sala 1 na solução *Offline* foi maior que o dobro da sua prioridade relativa inicial do mapa, entretanto, a diferença numérica absoluta é aproximadamente 0,06. As frequências relativas das salas restantes da solução *Offline* e as frequências relativas de todas as salas da solução em Tempo

Tabela 5.8: Prioridades do Mapa Quatro Diff.

Sala	Prioridade
1	1
2	1
3	5
4	5

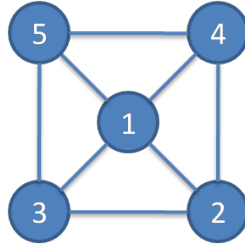


Figura 5.12: Grafo do Mapa X.

Real foram próximas às prioridades relativas iniciais do mapa. A tabela 5.13 mostra também que a solução Tempo Real foi melhor que a solução *Offline* através da diferença quadrática.

O gráfico (Figura 5.13) mostra que a solução em Tempo Real depois de estabilizar teve um desempenho inferior à solução *Offline*.

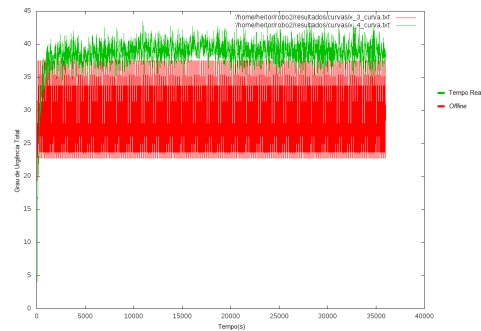


Figura 5.13: Gráfico do Mapa X.

- X Incompleto: Com cinco salas em formato de X (Prioridades iguais ao mapa anterior indicados na Tabela 5.11) com somente a sala do meio ligando as outras (Figura 5.14):

A sequência de salas a serem visitadas gerada pelo **gerador** foi: 1 2 3 4 5.

As prioridades relativas finais da solução em Tempo Real foram próximas às prioridades relativas iniciais do mapa, como mostra a Tabela 5.14.

A Tabela 5.15 mostra que as frequências relativas da solução *Offline* foram aproximadamente todas iguais, isso se deve ao fato de que a sequência de salas a serem

Tabela 5.9: Prioridades relativas do Mapa Quatro Diff.

Sala	<i>Offline</i>	Tempo Real
1	0,08333	0,08470
2	0,08333	0,08331
3	0,41667	0,41141
4	0,41667	0,42058

Tabela 5.10: Frequências Relativas do Mapa Quatro Diff.

Sala	Prioridade Rel.	<i>Offline</i>		Tempo Real	
		Freq.	Freq. Rel.	Freq.	Freq. Rel.
1	0,08333	546	0,16677	300,37	0,10130
2	0,08333	546	0,16677	296,35	0,09994
3	0,41667	1091	0,33323	1192,15	0,40206
4	0,41667	1091	0,33323	1176,27	0,39670
Diferença Quadrática		0,02785		0,00121	

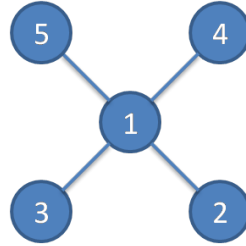


Figura 5.14: Grafo do Mapa X Incompleto.

visitadas gerada pelo **gerador** manda o robô visitar cada sala apenas uma única vez dentro do *loop*. Na mesma tabela pode-se ver também que as frequências relativas da solução em Tempo Real foram próximas às prioridades relativas iniciais do mapa. A tabela mostra também que a solução Tempo Real foi melhor que a solução *Offline* através da diferença quadrática.

O gráfico (Figura 5.15) mostra que a solução em Tempo Real depois de estabilizar teve um desempenho inferior à solução *Offline*.

- Espinha: Com seis salas de prioridades iguais (Tabela 5.16) em formato de espinha de peixe (Figura 5.16):

A sequência de salas a serem visitadas gerada pelo **gerador** foi: 1 5 2 6 3 7.

As prioridades relativas finais da solução em Tempo Real foram próximas às prioridades relativas iniciais do mapa, como mostra a Tabela 5.17.

A Tabela 5.18 mostra que as frequências relativas tanto da solução *Offline* quanto a em Tempo Real foram próximas às prioridades relativas iniciais do mapa. A Tabela

Tabela 5.11: Prioridades do Mapa X.

Sala	Prioridade
1	1
2	5
3	5
4	5
5	5



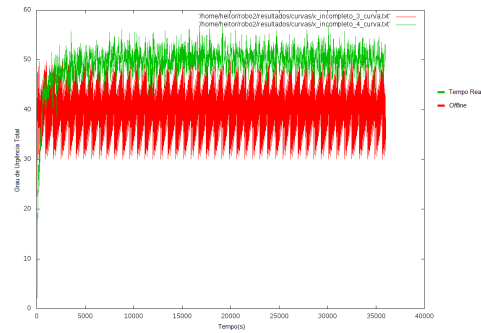


Figura 5.15: Gráfico do Mapa X Incompleto.

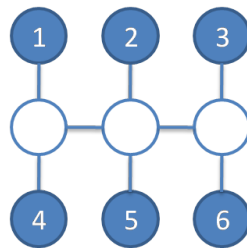


Figura 5.16: Grafo do Mapa .

5.18 mostra também que a solução *Offline* foi melhor que a solução Tempo Real através da diferença quadrática.

O gráfico (Figura 5.17) mostra que a solução em Tempo Real depois de estabilizar teve um desempenho inferior à solução *Offline*.

- Espinha Diff: Com seis salas de prioridades diferentes (Tabela 5.19) em formato de espinha de peixe (Figura 5.16):

A sequência de salas a serem visitadas gerada pelo **gerador** foi: 1 2 6 5 1 7 3 5.

As prioridades relativas finais da solução em Tempo Real foram próximas às prioridades relativas iniciais do mapa, como mostra a Tabela 5.20.

A Tabela 5.21 mostra que as frequências relativas da solução *Offline* foram diferentes das prioridades relativas iniciais do mapa, visitando as salas 1 e 5 o dobro de vezes que as demais salas, pois na sequência determinada pelo **gerador** as salas 1 e 5 aparecem duas vezes cada uma. Todavia as frequências relativas da solução em

Tabela 5.12: Prioridades relativas do Mapa X.

Sala	<i>Offline</i>	Tempo Real
1	0,04762	0,04983
2	0,23810	0,24044
3	0,23810	0,23870
4	0,23810	0,23501
5	0,23810	0,23602

Tabela 5.13: Frequências Relativas do Mapa X.

Sala	Prioridade Rel.	<i>Offline</i>		Tempo Real	
		Freq.	Freq. Rel.	Freq.	Freq. Rel.
1	0,04762	328	0,11134	151,35	0,05670
2	0,23810	655	0,22234	633,44	0,23729
3	0,23810	654	0,22200	635,52	0,23807
4	0,23810	655	0,22234	619,58	0,23210
5	0,23810	654	0,22200	629,54	0,23583
Diferença Quadrática		0,00508		0,00012	

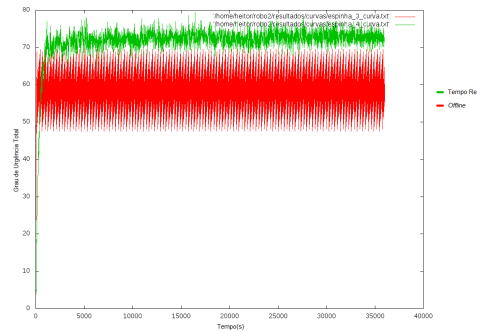


Figura 5.17: Gráfico do Mapa Espinha.

Tempo Real foram próximas às prioridades relativas iniciais do mapa. A Tabela 5.21 mostra também que a solução Tempo Real foi melhor que a solução *Offline* através da diferença quadrática.

O gráfico (Figura 5.18) mostra que a solução em Tempo Real depois de estabilizar teve um desempenho inferior à solução *Offline*.

- Apartamento: Com oito salas de prioridades diferentes (Tabela 5.22) simulando um apartamento real (Figura 5.19):

A seqüência de salas a serem visitadas gerada pelo **gerador** foi: 1 12 9 11 5 7 3 4.

As prioridades relativas finais da solução em Tempo Real foram próximas às prioridades relativas iniciais do mapa, como mostra a Tabela 5.23.

A Tabela 5.24 mostra que as frequências relativas da solução *Offline* foram aproximadamente todas iguais, isso se deve ao fato de que a seqüência de salas a serem

Tabela 5.14: Prioridades relativas do Mapa X Incompleto.

Sala	<i>Offline</i>	Tempo Real
1	0,04762	0,04598
2	0,23810	0,23794
3	0,23810	0,24530
4	0,23810	0,23984
5	0,23810	0,23094

Tabela 5.15: Frequências Relativas do Mapa X Incompleto.

Sala	Prioridade Rel.	<i>Offline</i>		Tempo Real	
		Freq.	Freq. Rel.	Freq.	Freq. Rel.
1	0,04762	456	0,20009	107,18	0,05481
2	0,23810	456	0,20009	467,55	0,23908
3	0,23810	456	0,20009	462,17	0,23633
4	0,23810	456	0,20009	455,16	0,23275
5	0,23810	455	0,19965	463,53	0,23703
Diferença Quadrática		0,02906		0,00009	

Tabela 5.16: Prioridades do Mapa Espinha.

Sala	Prioridade
1	2
2	2
3	2
5	2
6	2
7	2

visitadas gerada pelo **gerador** manda o robô visitar cada sala apenas uma única vez dentro do *loop*, porém as maiores diferenças numéricas são as das sala 4 e 5 que são aproximadamente 0,03. Na mesma tabela pode-se ver também que as frequências relativas da solução em Tempo Real foram próximas às prioridades relativas iniciais do mapa. A Tabela 5.24 mostra também que a solução em Tempo Real foi melhor que a solução *Offline* através da diferença quadrática.

O gráfico (Figura 5.20) mostra que a solução em Tempo Real depois de estabilizar teve um desempenho inferior à solução *Offline*.

### 5.4.1 Análise Comparativa

Foi calculada uma média do Grau de Urgência Total de cada solução em cada mapa com os últimos dez mil segundos (Tabela 5.25); analisando essa média nota-se que existe uma tendência de que quanto maior o número de salas mais eficiente será

Tabela 5.17: Prioridades relativas do Mapa Espinha.

Sala	<i>Offline</i>	Tempo Real
1	0,16667	0,16990
2	0,16667	0,16613
3	0,16667	0,16571
5	0,16667	0,16339
6	0,16667	0,16720
7	0,16667	0,16768

Tabela 5.18: Frequências Relativas do Mapa Espinha.

Sala	Prioridade Rel.	<i>Offline</i>		Tempo Real	
		Freq.	Freq. Rel.	Freq.	Freq. Rel.
1	0,16667	311	0,16694	274,01	0,16869
2	0,16667	311	0,16694	267,74	0,16483
3	0,16667	310	0,16640	271,14	0,16692
5	0,16667	311	0,16694	273,42	0,16832
6	0,16667	310	0,16640	262,80	0,16179
7	0,16667	310	0,16640	275,25	0,16945
Diferença Quadrática		0		0,00004	

Tabela 5.19: Prioridades do Mapa Espinha Diff.

Sala	Prioridade
1	5
2	1
3	2
5	2
6	1
7	1

a solução *Offline* em relação à solução em Tempo Real, como mostra o gráfico na Figura 5.21.

## 5.5 Conclusão

Analisando os testes pode-se constatar que:

- Segundo o critério de avaliação de frequência relativa, a solução em Tempo Real foi superior à solução *Offline*, pois foi mais eficiente em cinco dos sete testes e na soma total das diferenças quadráticas (0,10812 da solução *Offline* contra 0,00652 da solução em Tempo Real);

Tabela 5.20: Prioridades relativas do Mapa Espinha Diff.

Sala	<i>Offline</i>	Tempo Real
1	0,41667	0,41297
2	0,08333	0,08386
3	0,16667	0,16624
5	0,16667	0,17418
6	0,08333	0,07849
7	0,08333	0,08427

Tabela 5.21: Frequências Relativas do Mapa Espinha Diff.

Sala	Prioridade Rel.	Offline		Tempo Real	
		Freq.	Freq. Rel.	Freq.	Freq. Rel.
1	0,41667	462	0,25000	585,01	0,35364
2	0,08333	231	0,12500	167,40	0,10119
3	0,16667	231	0,12500	283,61	0,17144
5	0,16667	462	0,25000	294,42	0,17798
6	0,08333	231	0,12500	156,95	0,09488
7	0,08333	231	0,12500	166,87	0,10087
Diferença Quadrática		0,04167		0,00488	

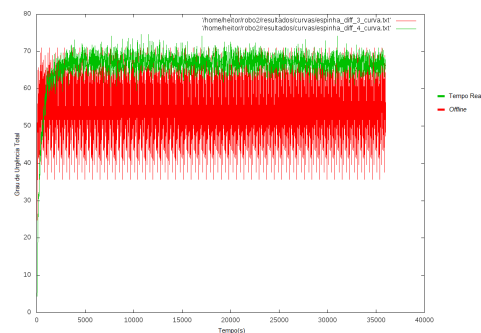


Figura 5.18: Gráfico do Mapa Espinha Diff.

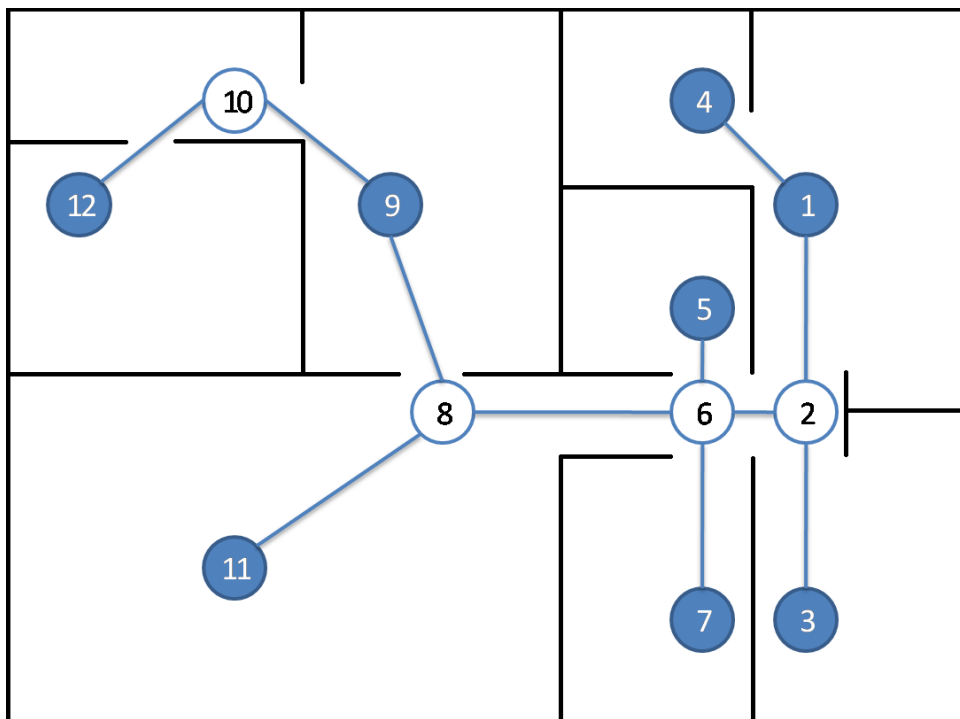


Figura 5.19: Grafo do Mapa Apartamento.

- Segundo o critério de avaliação de Grau de Urgência Total a solução *Offline* foi melhor que a solução em Tempo Real em todos os testes realizados e o gráfico da Figura 5.21 mostrou que existe uma tendência de que quanto maior o número de salas

Tabela 5.22: Prioridades do Mapa Apartamento.

Sala	Prioridade
1	5
3	5
4	3
5	3
7	5
9	4
11	4
12	4

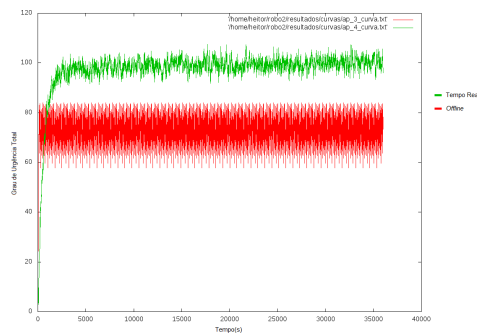


Figura 5.20: Gráfico do Mapa Apartamento.

maior será a eficiência da solução *Offline* em relação à solução em Tempo Real.

Era esperado que a solução *Offline* tivesse um desempenho pior que a solução em Tempo Real no critério de avaliação de frequência relativa, pois a avaliação das seqüências de salas à visitar é baseada somente no Grau de Urgência Total; e o desempenho das soluções segundo o critério de avaliação de Grau de Urgência Total mostra que o robô, seguindo uma heurística simples, tem um desempenho inferior do que uma solução que determina a seqüência de salas a serem visitadas, baseada no Grau de Urgência Total, antes de colocar o robô no ambiente.

Tabela 5.23: Prioridades relativas do Mapa Apartamento.

Sala	<i>Offline</i>	Tempo Real
1	0,15152	0,15426
3	0,15152	0,15233
4	0,09091	0,08996
5	0,09091	0,08924
7	0,15152	0,14934
9	0,12121	0,12566
11	0,12121	0,12133
12	0,12121	0,11789

Tabela 5.24: Frequências Relativas do Mapa Apartamento.

Sala	Prioridade Rel.	<i>Offline</i>		Tempo Real	
		Freq.	Freq. Rel.	Freq.	Freq. Rel.
1	0,15152	247	0,12525	234,33	0,14970
3	0,15152	246	0,12475	237,48	0,15172
4	0,09091	246	0,12475	152,10	0,09717
5	0,09091	246	0,12475	147,87	0,09447
7	0,15152	246	0,12475	222,23	0,14197
9	0,12121	247	0,12525	194,75	0,12442
11	0,12121	247	0,12525	187,90	0,12004
12	0,12121	247	0,12525	188,62	0,12050
Diferença Quadrática		0,00446		0,00016	

Tabela 5.25: Média dos Últimos Dez Mil Segundos.

Mapa (N# de Salas)	<i>Offline</i>	Tempo Real
Quatro (4)	25,000	28,150
Quatro Diff (4)	20,980	28,346
X (5)	28,905	38,753
X Incompleto (5)	39,719	50,326
Espinha (6)	58,527	72,622
Espinha Diff (6)	55,557	66,711
Apartamento (8)	73,318	100,217

Por fim, o que determina qual solução deve ser utilizada depende da aplicação. Se para a aplicação a frequência relativa for mais importante do que manter o Grau de Urgência baixo, deve-se escolher a solução em Tempo Real, porém se para a aplicação for mais importante manter o Grau de Urgência baixo deve-se escolher a solução *Offline*, que foi baseada no Grau de Urgência Total.

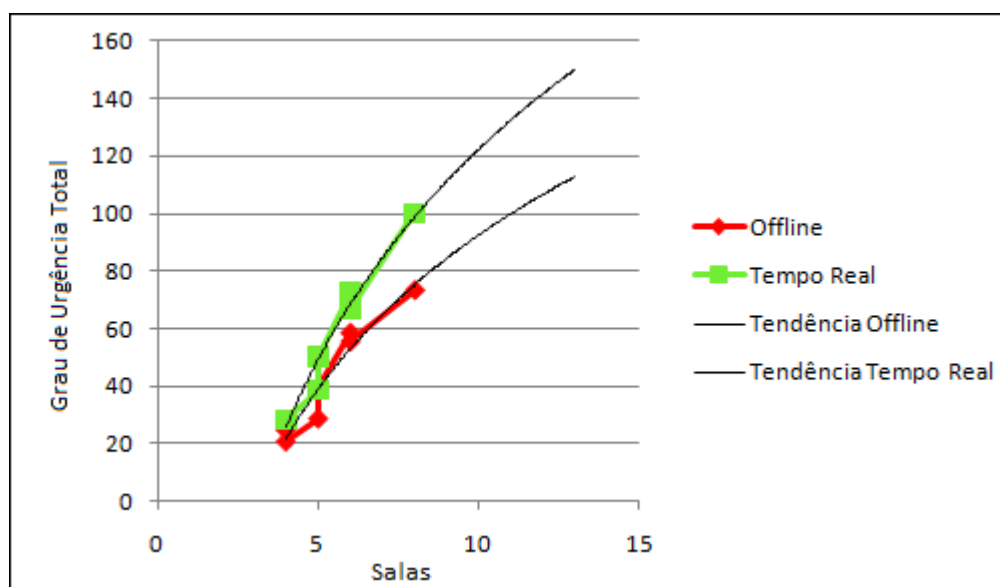


Figura 5.21: Tendência de Desempenho



---

## Referências Bibliográficas

---

- [1] B. V. Adôrno, C. S. R. Aguiar, and G. A. Borges. PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA PARA o ROBÔ OMNI UTILIZANDO o ALGORITMO MAPA DE ROTAS PROBABILÍSTICO. 2005.
- [2] H Andreasson, A Treptow, and Duckettm t. Self-localization in non-stationary environments using omni-directional vision. *Robotics and Autonomous System*, 55:541–551, 2007.
- [3] M. N. Arenales, V. ARMENTANO, R. MORABITO, and H. YANASSE. *Pesquisa operacional*. Elsevier Campus, 2007.
- [4] Lowell W. Beineke and Robin J. Wilson. *Selected Topics in Graph Theory*. Academic Press, 1978.
- [5] J. Borenstein and Y. Koren. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 7(3):278–288, 1991.
- [6] T. Braunl. *Embedded robotics: mobile robot design and applications with embedded systems*. Springer-Verlag New York Inc, 2008.
- [7] W. Burgard, D. Fox, D. Henning, and T. Schmidt. Estimating the absolute position of a mobile robot using position probability grids. 1996.
- [8] T. H. Cormen. *Introduction to Algorithms*. MIT Press, 2001.
- [9] Janderson Rodrigo de Oliveira. Um sistema integrado para navegação autônoma de robôs móveis. Master’s thesis, ICMC-USP, 2010.

- [10] G. Dudek and M. Jenkin. *Computational Principles of Mobile Robotics*. Cambridge University Press, 2000.
- [11] FriendlyRobotics. Robomow® lawn mower - automatic lawnmower. <http://www.friendlyrobotics.com/>.
- [12] B. Gates. A robot in every home. *Scientific American Magazine*, 296(1):58–65, 2007.
- [13] K. Goldberg. *Algorithmic foundations of robotics*. AK Peters, 1995.
- [14] Michel Gondran, Michel Minoux, and Steven Vajda. *Graphs and algorithms*. John Wiley & Sons, Inc., 1984.
- [15] F. J. Heinen and F. Osório. Sistema de controle híbrido para robôs móveis autônomos. *WTDIA/SBIA - Workshop De Teses E Dissertações D Inteligência Artificial, 2002*, 2002.
- [16] IRobot. iRobot corporation. <http://store.irobot.com/corp/index.jsp>.
- [17] J. L. Jones, A. M. Flynn, and B. A. Seiger. *Mobile Robots: Inspiration to Implementation*. AK Peters, Ltd., 1999.
- [18] J. C. Latombe. *Robot Motion Planning*. Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [19] P. Mckerrow. *Introduction to Robotics*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA, 1991.
- [20] Adelardo A. D. Medeiros. Introdução à robótica. pages 56–65, Natal, RN, Brasil, July 1998.
- [21] MobileRobots. Pioneer. <http://www.activrobots.com/ROBOTS/p2dx.html>.
- [22] R. Murphy. *Introduction to AI Robotics*. MIT Press, 2000.
- [23] NASA. Mars pathfinder. <http://mpfwww.jpl.nasa.gov/default.html>.
- [24] Gonçalo Neto and Hugo Costelha. NAVEGAÇÃO TOPOLÓGICA PARA FUTEBOL ROBÓTICO. *UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA*, 2003.
- [25] C. F. Olson. Probabilistic self-localization for mobile robot. *IEEE Transactions On Robotics And Automation*, 16(1):55–66, 2000.
- [26] G. L. Ottoni. Planejamento de trajetórias para robôs móveis. *Projeto de Graduação em Engenharia de Computação-FURG, Rio Grande*, 2000.

- [27] Diogo Pinheiro Fernandes Pedrosa, Adelardo Adelino Dantas Medeiros, and Pablo Javier Alsina. Sistema de navegação para robôs móveis autônomos. *Latin American Knowledge Harvester*, October 2001.
- [28] Player. Player project. <http://playerstage.sourceforge.net/>.
- [29] Stuart Jonathan Russell, Peter Norvig, John F. Canny, and John F. Canny Peter Norvig. *Artificial Intelligence*. Prentice Hall, 2003.
- [30] Jean Miler Scatena and Eduardo Marques. Implementação de mapas topológicos para navegação de robôs móveis baseada em computação reconfigurável. *Simpósio Latino Americano em Aplicações de Lógica Programável e Processadores Digitais de Sinais em Processamento de Vídeo, Visão Computacional e Robótica (SLALP 2004)*, 1:1–10, 2004.
- [31] R. Siegwart and I. R. Nourbakhsh. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. MIT Press, 2004.
- [32] S. Thrun. Learning metric-topological maps for indoor mobile robot navigation. *Artificial Intelligence*, 99(1):21–71, 1998.
- [33] S. Thrun and A. Bücken. Integrating grid-based and topological maps for mobile robot navigation. In *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE*, pages 944–951, 1996.
- [34] S. Thrun, J. S. Gutmann, D. Fox, W. Burgard, and B. J. Kuipers. Integrating topological and metric maps for mobile robot navigation: A statistical approach. In *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*, pages 989–996. JOHN WILEY & SONS LTD, 1998.
- [35] S. Thrun, S. Thayer, W. Whittaker, C. Baker, W. Burgard, D. Ferguson, D. Hahnel, D. Montemerlo, A. Morris, Z. Omohundro, C. Reverte, and Whittaker W. Autonomous exploration and mapping of abandoned mines. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 11(4):79–91, 2004.
- [36] Sebastian Thrun. Probabilistic robotics. *Commun. ACM*, 45(3):52–57, 2002.
- [37] J. Wolf, W. Burgard, and H. Burkhardt. Robust vision-based localization by combining an image-retrieval system with monte carlo localization. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(2):208–216, 2005.
- [38] N. Ziviani and R. Terada. *Projeto de algoritmos com implementações em Pascal e C*. Thomson, 2004.