

UMA ABORDAGEM REATIVA PARA EXPLORAÇÃO DE ROBÔS MÓVEIS USANDO SISTEMAS FUZZY TIPO-2 INTERVALAR HIERÁRQUICO

WANDERSON A. DE SOUSA SILVA* WILSON LEAL* DYÔGO MEDEIROS* RANULFO P. B. NETO*
RONNASAYD MACHADO† JOSE DE O. B. NETO† ANDRE MACEDO SANTANA* RICARDO A. L.
RABELO*

**Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal do Piauí (UFPI)
Teresina, Piauí, Brasil*

*†Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Estadual do Piauí (UESPI)
Teresina, Piauí, Brasil*

Email: wass120@hotmail.com, wilsonlealjunior@hotmail.com, dyogomedeiross@gmail.com,
ranulfo0s@gmail.com, ronnasayd@hotmail.com, jbritoneto@globo.com,
andremacedo@ufpi.edu.br, ricardoalr@ufpi.edu.br

Abstract— Mobile Robot navigation is one of the main topics of autonomous robotics and it holds two main tasks: to reach the target and dodge any obstacles that might exist on the path to the target. In autonomous robotics is common the emerging of uncertainties sources. And many of these uncertainties sources influence the performance of the autonomous navigation system. The proposal in this work is to offer a reactive approach of robotics exploration using a Interval Type-2 Hierarchical Fuzzy Inference System (IT2-HFIS) in a unknown indoor environment. In simulations, a three wheeled robot explored three different scenarios to analyse its time lapse, distance, velocities, acceleration and energy consumption. The results have shown that the suggested approach reached a satisfying performance for autonomous robot navigation using IT2-HFIS.

Keywords— mobile robots, reactive exploration, hierarchical type-1 fuzzy, hierarchical interval type-2 fuzzy.

Resumo— A navegação de robôs móveis é um dos principais tópicos da robótica autônoma e possui duas principais tarefas: alcançar o alvo e desviar de obstáculos que podem haver no caminho até o seu alvo. Em navegação autônoma é comum o surgimento de fontes de incerteza. E muitas dessas fontes de incerteza influenciam o desempenho do sistema de navegação autônoma. A proposta deste trabalho é oferecer uma abordagem reativa de exploração robótica usando um Sistema de Inferência *Fuzzy* Tipo-2 Intervalar Hierárquico (SIFT-2IH) em ambientes *indoor* desconhecidos. Em simulações, um robô de três rodas explorou três cenários distintos para a análise do tempo, distância, velocidade, aceleração e energia consumida pelo robô. Os resultados mostraram que a abordagem proposta alcançou um desempenho satisfatório para navegação de robôs autônomos usando SIFT-2IH.

Palavras-chave— robôs móveis, exploração reativa, *fuzzy* tipo-1 hierárquico, *fuzzy* tipo-2 intervalar hierárquico.

1 Introdução

A navegação de robôs móveis é um dos principais tópicos da robótica autônoma e possui duas principais tarefas: alcançar o alvo e desviar de obstáculos que podem haver no caminho até o seu alvo, (Siegwart et al., 2011). A navegação é resultado da combinação de três competências fundamentais da robótica móvel: mapeamento, localização e planejamento de caminhos. A combinação entre o mapeamento e o planejamento de caminhos resulta na exploração. A exploração guia o robô durante o mapeamento permitindo-o que tenha uma cobertura do ambiente por meio de seus sensores. Em ambientes desconhecidos e incertos, as abordagens que usam estratégias com informações precisamente conhecidas do ambiente são menos robustas e, geralmente, demandam maior complexidade computacional (Kim and Chwa, 2015). Por outro lado, as abordagens reativas focam em criar uma resposta imediata do robô para desviar de obstáculos e alcançar seu ob-

jetivo sem a necessidade de conhecer o ambiente com antecedência. Por tanto, a escolha de uma abordagem para exploração pode contribuir para o aumento do desempenho computacional do robô no processo de navegação em ambientes desconhecidos.

Em navegação autônoma é comum o surgimento de fontes de incerteza (deslizamento das rodas, colisão inesperada, falha na leitura dos sensores, etc). E muitas dessas fontes de incerteza influenciam o desempenho do sistema de navegação autônoma. Para superar tais incertezas, alguns trabalhos (Hagras, 2004a)(Hagras, 2004b)(Amador-Angulo et al., 2013) tem apresentado o Sistema de Inferência *fuzzy* Tipo-1 (SIFT-1) como uma abordagem robusta, flexível e capaz de lidar com navegação em tempo real. Entretanto, o SIFT-1 tem limitada capacidade de lidar com as incertezas de forma direta. Por usar um conjunto *fuzzy* definido de forma inapropriada para modelagem direta de incertezas (Mendel et al., 2014), o SIFT-1 não é capaz de manter

um bom desempenho mediante a fontes de dados incompletos e incertos. No entanto, o Sistema de Inferência *Fuzzy* Tipo-2 (SIFT-2) cria a possibilidade de modelar e manter tais incertezas (Mendel et al., 2014). Além disso, o controle de robôs móveis por Sistemas de Inferência *Fuzzy* (SIF) tem apresentado o problema de crescimento exponencial de sua base de regras em função do incremento do número de variáveis de entrada e um grande número de entradas e saídas no robô (Hagras, 2004a). Para superar esse problema, Sistemas de Inferência *Fuzzy* Hierárquicos (SIFH) têm apresentado uma propriedade de aumentar o número de regras em taxa linear.

Para a elaboração do estado da arte deste trabalho, foram realizadas pesquisas de alguns trabalhos relacionados. Os autores em (Silva et al., 2014) submeteram um robô de duas rodas em três cenários simulados. Para cada cenário, o robô realiza uma navegação baseada em comportamento com o SIFT-1 e SIFT-2I (Sistema de Inferência *fuzzy* Tipo-2 Intervalar). Ao final de cada simulação são analisadas três métricas (erro com relação a linha de referência, o tempo de navegação e a distância realizada pelo robô). Em sua conclusão, os autores afirmam que o uso do SIFT-2I para navegação segura em ambientes incertos é uma proposta atrativa. O trabalho realizado em (Yang-zhi et al., 2015) propõe uma abordagem para desvio de obstáculos para um robô de duas rodas com SIFT-1H (Sistema de Inferência *Fuzzy* Tipo-1 Hierárquico). Para validar sua abordagem, o trabalho simula a navegação do robô em um cenário simples com SIFs convencional e hierárquico. Os autores chegaram a conclusão que o SIF hierárquico capacitou o robô a concluir, efetivamente, sua navegação sem colidir em obstáculos e por ter alcançado seu objetivo. O trabalho em (Kim and Chwa, 2015) apresenta um método *fuzzy* tipo-2 intervalar Neural (IT2NN) para desvio de obstáculos e para o posicionamento estável de robôs moveis com rodas. Nesse trabalho, os autores usaram o robô para navegar em dois cenários, com até três obstáculos. Nos resultados, simulados e experimentais, o robô foi capaz de desviar dos obstáculos e obter uma posição estável, com relação ao seu objetivo. Após a análise das velocidades, linear e angular, os autores compararam o desempenho do método proposto com o método *fuzzy* tipo-1 (T1FNN) utilizando o erro da distância entre o robô e seu objetivo e a distância percorrida pelo robô. Assim os autores concluíram que o método proposto utilizando *fuzzy* tipo-2 intervalar implicou em uma navegação com menor caminho, uma trajetória mais suave e menor esforço na tarefa de controle, se comparado ao método com *fuzzy* tipo-1.

Este trabalho tem como proposta uma abordagem Sistema de Inferência *Fuzzy* Tipo-2 Intervalar Hierárquico (SIFT-2IH) em exploração

robótica usando mapas em grade de ocupação (Elfes, 1987) que foi resultado da combinação do algoritmo de fronteira proposto em (Yamauchi, 1997) e o algoritmo de planejamento proposto em (Akers, 1967). Essa abordagem é simulada em ambientes desconhecidos com o intuito de construir mapas em grade de ocupação durante a exploração de seus respectivos ambientes desconhecidos. Já assumindo a posição conhecida, um robô seguidor de paredes é lançado em três cenários para a construção de um mapa em grade de ocupação. Simulações são realizadas submetendo o robô a três configurações *fuzzy*: Configuração *Fuzzy* Adjacente (CFA), Configuração *Fuzzy* Médio (CFM) e Configuração *Fuzzy* Distante (CFD). Essas configurações foram modeladas com o intuito de analisar o desempenho do SIFT-1 e SIFT-2I no processo de exploração nos cenários. Para essa análise, as seguintes métricas foram estudadas: tempo, distância, velocidade linear, aceleração e energia consumida pelo robô.

2 Abordagem Proposta

A proposta deste trabalho é oferecer uma abordagem reativa de exploração robótica usando um Sistema *Fuzzy* Tipo-2 Intervalar Hierárquico (SIFT-2IH) em ambientes *indoor* desconhecidos. A aplicação da abordagem proposta deste trabalho é apresentada na Figura 1. Primeiro (Figura 1a), o robô detecta o obstáculo. Em seguida (Figura 1b), três configurações *fuzzy* (CFA, CFM e CFD) são propostas para analisar o quanto a proximidade de um obstáculo influencia no desempenho da navegação do robô seguidor de paredes. Na sequência da abordagem (Figura 1c), um algoritmo de exploração é aplicado com o intuito de capacitar o robô a navegar em ambientes mais complexos, para isso ele planeja um caminho até a fronteira mais próxima computada pelo robô. Finalmente (Figura 1d), uma trajetória é gerada seguindo as restrições de distância (proximidade entre o obstáculo detectado e da fronteira alvo) e de velocidade (imposta pela configuração *fuzzy* selecionada), além de executar a trajetória gerada de forma a seguir as velocidades impostas pelos SIFs.

Na Figura 2, o robô é submetido a três cenários simples para avaliação de seu comportamento com as configurações *fuzzy*. Na Figura 2a, o cenário possui apenas um obstáculo a esquerda do robô. Nesse cenário, a CFA permite ao robô se aproximar o mais próximo possível do obstáculo aplicando velocidade baixa em suas rodas. Continuando na mesma figura, a CFD possibilita ao robô posicionar-se a uma distância máxima do obstáculo aplicando velocidade alta em suas rodas. Ainda na mesma figura, a CFM habilita o robô a posicionar-se a uma distância mediana do obstáculo e aplica velocidades intermediárias, com relação ao CFA e CFD. Na Figura 2b, as mesmas

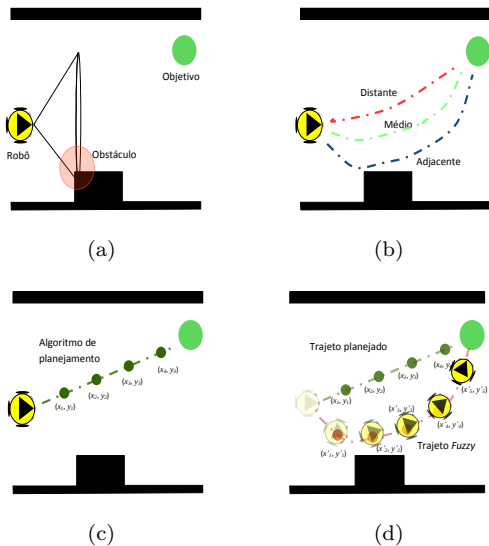


Figura 1: Ilustração da abordagem proposta.

configurações *fuzzy* são submetidas a um cenário com dois obstáculos. Nesse cenário, o objetivo é avaliar as configurações *fuzzy* submetendo o robô a obstáculos na esquerda e direita. Finalmente na Figura 2c, as configurações *fuzzy* são submetidas a um cenário com três obstáculos (esquerdo, direito e frontal).

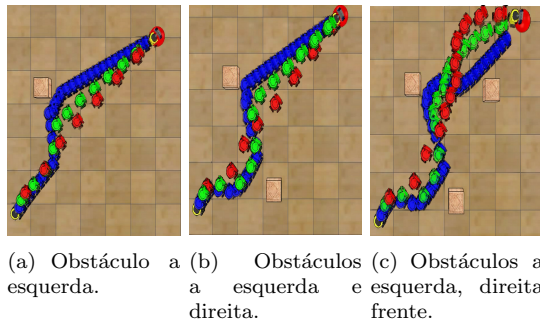


Figura 2: Cenários para avaliação das configurações *fuzzy* para o controle do robô com o SIFT-1H e SIFT-2IH. Em azul, a representação do trajeto realizado pelo robô com a CFA. Em verde, a trajetória com CFM. Em vermelho, a trajetória com CFD.

Um robô (Figura 3a) de três rodas, motores independentes, e nove sonares (com modelo de ruído extraído do sonar SRF05) é lançado em cenários estáticos (Figuras 3b, 3c e 3d - $5 \times 5m$ cada) para exploração enquanto se movimenta pelo ambiente adotando o comportamento de um seguidor de paredes, já assumindo a posição do robô conhecida. No cenário 1 (Figura 3b), o robô navega em um escritório onde é destacado como principal característica o obstáculo em formato de "U" (mesa do escritório). No cenário 2 (Figura 3c), a principal característica é destacada na irregularidade de alguns cantos (centro do cenário). No

cenário 3 (Figura 3d), o robô navega uma casa com 5 cômodos. A principal característica desse cenário é sua semelhança com uma casa real.

Com o objetivo de alcançar a proposta deste trabalho, foi implementada uma estratégia de exploração baseada no algoritmo de fronteira-próxima. Essa estratégia consiste em combinar o algoritmo proposto em (Yamauchi, 1997) e o algoritmo de planejamento proposto em (Akers, 1967). Portanto, à medida que o robô detecta uma nova fronteira, ele calcula uma rota para chegar até essa fronteira. Na Figura 4, uma ilustração do algoritmo de exploração fronteira próxima é mostrada. Na Figura 4a, o robô é inserido no ambiente desconhecido. Na Figura 4b, o robô aciona seus sensores, o modelo parcial do ambiente é obtido e o algoritmo explorador retorna um caminho em direção a fronteira detectada. Nas Figuras 4c-4e, o procedimento que ocorre em 4b é repetido até que não haja mais fronteiras detectadas. Finalmente na Figura 4f, o mapa construído após a exploração no ambiente.

3 Implementação

Para alcançar os resultados apresentados neste trabalho foram utilizadas as ferramentas V-REP (Rohmer et al., 2013) e o JUZZY (Wagner, 2013). O V-REP foi utilizado para modelagem dos cenários e o robô, assim como a execução de toda a simulação. O JUZZY foi utilizado para a modelagem das configurações *fuzzy*. As simulações foram divididas em três etapas. Na primeira etapa da simulação, o robô navegou o cenário adotando a CFD. Nessa configuração, o robô procura desenvolver sua velocidade máxima enquanto procura manter uma máxima distância do obstáculo detectado. Na segunda etapa, a CFM foi utilizada. Nessa configuração, o robô aplica velocidades médias nas rodas enquanto procura manter uma distância média do obstáculo detectado. Por fim, o robô é submetido à CFA. Nessa configuração, o robô desenvolve uma velocidade baixa enquanto procura se aproximar do obstáculo detectado. Em cada etapa é realizada uma simulação com o SIFT-1H e SIFT-2IH. O critério de parada é alcançado quando todo o cenário é explorado.

Neste trabalho, o processo de exploração é construído por meio da leitura de nove sonares distribuídos na frente do robô (esquerdo, direito e centro), onde o ruído é gerado a partir da soma dos senos extraído do sensor SRF05 e implementado no simulador. Em cada célula da grade de ocupação é atribuído o valor incremental correspondente a probabilidade de ocupação do obstáculo, ou a probabilidade dessa célula está ocupada. Inicialmente, todas as células, matriz bidimensional de tamanho 80×80 , possuem o valor 0.5 que representa uma posição desconhecida na

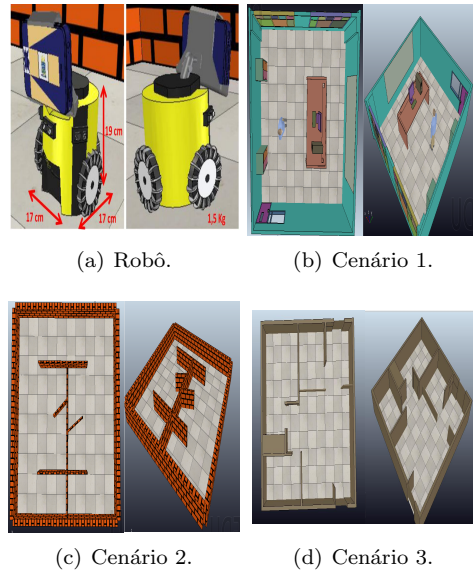


Figura 3: Elementos de simulação.

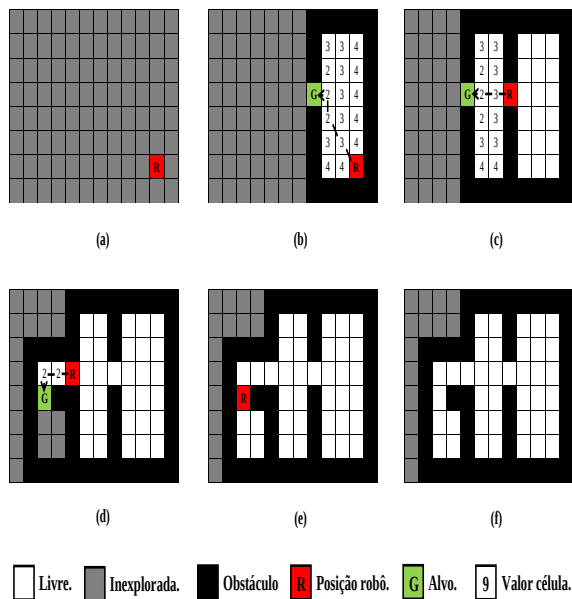


Figura 4: Algoritmo de exploração.

grade de ocupação probabilística.

Aqui, para a simulação da navegação do robô nos cenários propostos foram adotadas alguns parâmetros para o SIFT-1H e SIFT-2IH. As configurações dos parâmetros de entrada para o SIFT-1H e SIFT-2IH são as distâncias e a orientação. O sistema de inferência utilizado é o operador mínimo de Mamdani e o método centroide para obtenção das saídas, que representam as velocidades aplicadas nas rodas direita, esquerda e central. A distância é a entrada passada aos SIFs que corresponde a menor distância lida pelos nove sonares do robô. A orientação é uma entrada que descreve o ângulo entre o robô e o objetivo a ser alcançado. As saídas crisp do SIFT-1H e SIFT-2IH descrevem as velocidades empregadas nas rodas direita, esquerda e central do robô. Neste trabalho, as funções de pertinências que descrevem as saídas crisp, no SIFT-1H e SIFT-2IH, são as mesmas. A base de regras do SIFT-1H e SIFT-2IH possuem as mesmas regras. Para cada roda, 16 regras no primeiro nível da hierarquia *fuzzy* e 20 no segundo nível.

Na Figura 5, o diagrama representa a rotina realizada nas simulações. No diagrama, o *loop* principal representa o núcleo da sequência de atividades realizadas pelo robô. Primeiramente, o robô realiza o sensoriamento do ambiente, onde, as distâncias obtidas pelos sensores são obtidas por uma função *getDistSim()* do simulador. Na etapa de localizar, o robô extrai do simulador, por meio de uma função *getPositionSim()*, a localização do robô (x, y) e sua orientação (θ). Na etapa de mapear, uma matriz com o modelo do mapa capturado pelos sensores é obtido, tendo como parâmetros de entrada os valores das etapas anteriores. Na etapa de planejar, a posição do robô (x, y, θ) e a posição do alvo (x', y', θ') a ser seguido pelo robô são obtidos pelo caminho gerado pelo algoritmo planejador de caminho (*getPathToFrontier()*), que tem como entrada a matriz do mapa corrente. Em seguida, uma trajetória é gerada com o sistema *fuzzy* (*getFuzzyJUZZY()*), sendo os seus parâmetros de entrada os parâmetros de saída da etapa de planejamento. Por fim, a etapa anterior gera velocidades (*fuzzyValues*) que serão executadas nas três rodas do robô pela função *setVelocitySim()* do simulador.

4 Resultados

Para análise da qualidade da exploração do ambiente foram empregadas as seguintes métricas: tempo, distância, velocidade linear (média e desvio padrão), aceleração (média e desvio padrão) e energia consumida pelo robô (Hu and Lee, 2005). Todas essas métrica são extraídas dos 3 cenários simulados e exibidas nas Tabelas 1, 2 e 3. Nas tabelas, são exibidas as medidas das métricas realizadas durante a navegação do robô em cada

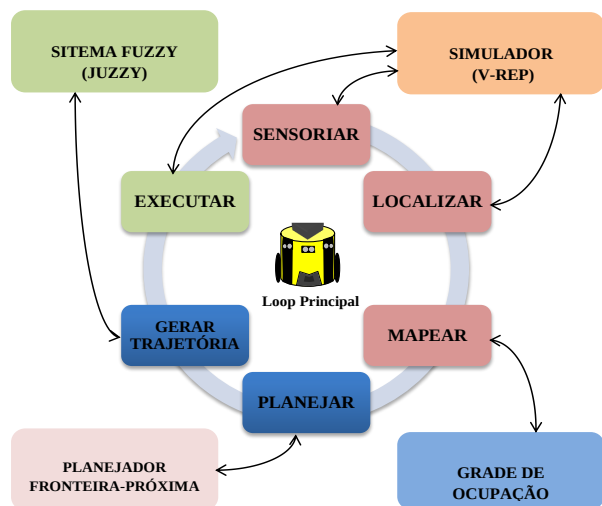


Figura 5: Diagrama da implementação da abordagem.

cenário. Em cada tabela, as métricas tempo, distância e energia são destacadas (em negrito) como seus respectivos mínimos, para cada SIFH. Para cada cenário são apresentadas duas tabelas com as métricas obtidas pelo simulador com o SIFT-1H e SIFT-2IH. Entre essas tabelas são destacados (em vermelho) o melhor resultado, para cada métrica, entre os SIFHs.

Uma análise feita nos três cenários mostrou que o tempo de navegação para a CFD foi menor no cenário 1 e 2 (Tabelas 1 e 2). Esse resultado se verifica devido as altas velocidades aplicadas nas rodas do robô, permitindo-o desenvolver maior velocidade linear. Já com relação a distância, a CFM apresentou as menores distâncias percorridas em todos os cenários. Esse resultado acontece devido as baixas velocidades lineares e angulares desenvolvidas pelo robô e uma menor distância entre o robô e o obstáculo, que permite ao robô sensoriar as fronteiras nos cantos com maior facilidade. O maior consumo de energia foi verificado com a CFD (Tabela 3). Esse fenômeno aconteceu devido a CFD apresentar maiores desvios de aceleração/desaceleração durante as navegações, além de desempenhar maiores distâncias no robô. Já o menor consumos de energia, nos três cenários, foi apresentado com a CFA ou CFM. Foi observado que o menor consumo está associado aos baixos desvios de aceleração/desaceleração e a distância percorrida pelo robô.

Uma análise entre o SIFT-1H e SIFT-2IH foi realizado com o objetivo de destacar suas principais diferenças. No cenário 1, o SIFT-1H, apresentou o menor tempo, a menor distância percorrida e menor consumo de energia (Tabela 1). No cenário 2, o SIFT-2IH apresentou menor distância e menor consumo de energia (Tabela 2). No cenário

Tabela 1: Métricas no cenário 1.

SIFT-1H					
	Tempo (s)	Distância (m)	Energia (KW)	Velocidade (m/s)	Aceleração (m/s ²)
CFD	1.1254e+03	101.39	3.08	0.0741 ± 0.0386	8.4210e-05 ± 0.1215
CFM	1.2736e+03	83.60	2.65	0.0566 ± 0.0289	3.6747e-05 ± 0.0748
CFA	2.8176e+03	129.09	4.50	0.0435 ± 0.0169	7.3308e-06 ± 0.0458

SIFT-2IH					
	Tempo (s)	Distância (m)	Energia (KW)	Velocidade (m/s)	Aceleração (m/s ²)
CFD	1.2926e+03	116.73	3.60	0.0755 ± 0.0380	1.0744e-04 ± 0.1225
CFM	1.2070e+03	84.36	2.79	0.0627 ± 0.0296	6.7914e-05 ± 0.1055
CFA	1.8366e+03	87.38	3.13	0.0463 ± 0.0179	2.3752e-05 ± 0.0426

Tabela 2: Métricas no cenário 2.

SIFT-1H					
	Tempo (s)	Distância (m)	Energia (KW)	Velocidade (m/s)	Aceleração (m/s ²)
CFD	715.80	73.12	2.36	0.0890 ± 0.0447	1.9237e-04 ± 0.1831
CFM	862	62.25	2.09	0.0659 ± 0.0333	4.2757e-05 ± 0.1055
CFA	1.6628e+03	72.16	2.39	0.0390 ± 0.0174	2.3482e-05 ± 0.0461

SIFT-2IH					
	Tempo (s)	Distância (m)	Energia (KW)	Velocidade (m/s)	Aceleração (m/s ²)
CFD	939.	85.31	2.68	0.0772 ± 0.0423	8.6803e-05 ± 0.1575
CFM	748.40	59.04	2.02	0.0731 ± 0.0315	2.8692e-05 ± 0.1180
CFA	1.2812e+03	59.50	1.98	0.0420 ± 0.0161	3.8698e-05 ± 0.0447

Tabela 3: Métricas no cenário 3.

SIFT-1H					
	Tempo (s)	Distância (m)	Energia (KW)	Velocidade (m/s)	Aceleração (m/s ²)
CFD	2.2836e+03	233.75	6.67	0.0789 ± 0.0427	5.7500e-05 ± 0.1736
CFM	874.4	59.35	1.88	0.0582 ± 0.0280	1.0730e-04 ± 0.0834
CFA	1.5364e+03	65.66	2.11	0.0374 ± 0.0157	3.3269e-06 ± 0.0438

SIFT-2IH					
	Tempo (s)	Distância (m)	Energia (KW)	Velocidade (m/s)	Aceleração (m/s ²)
CFD	857.6	72.44	2.11	0.0666 ± 0.0342	6.7472e-05 ± 0.1272
CFM	781.8	58.64	1.89	0.0657 ± 0.0297	1.9048e-05 ± 0.0938
CFA	1.8510e+03	84.02	2.72	0.0400 ± 0.0155	1.6420e-05 ± 0.0492

3, o SIFT-2IH apresentou menor tempo e menor distância percorrida (Tabela 3). Considerando as métricas e os cenários propostos neste trabalho, o SIFT-2IH mostrou melhor desempenho que o SIFT-1H, na maioria dos cenários.

5 Conclusão

As configurações *fuzzy* propostas neste trabalho podem ser utilizadas de acordo com o objetivo da aplicação a que o robô será submetido. No caso de uma aplicação onde o robô precisa explorar um ambiente desconhecido em menor tempo, a CFD seria a configuração mais apropriada. No caso de uma aplicação onde o robô precisa oferecer baixo consumo de energia, porém não é rigorosa com o tempo de exploração do ambiente, a CFA seria mais apropriada. No entanto, se a aplicação não possui restrições rigorosas de tempo, distância e consumo de energia a CFM seria a mais apropriada.

Neste trabalho, foi apresentado uma abordagem reativa de exploração robótica usando sistemas *fuzzy* em ambientes *indoor* desconhecidos. Para isso, o robô utilizou um algoritmo de exploração que foi resultado da combinação de soluções clássicas da literatura. Ao final de cada exploração, foram analisadas métricas que permitiram comparar o desempenho de exploração entre o SIFT-1H e SIFT-2IH. Concluindo que este trabalho ofereceu uma abordagem satisfatória para navegação de robôs autônomos usando SIFT-2IH.

6 Agradecimentos

Agradecemos ao apoio oferecido pela Fundação de Amparo a Pesquisa do Piauí (FAPEPI).

Referências

- Akers, S. B. (1967). A Modification of Lee's Path Connection Algorithm, *IEEE Transactions on Electronic Computers* **EC-16**(1): 97–98.
- Amador-Angulo, L., Castillo, O. and Pulido, M. (2013). Comparison of fuzzy controllers for the water tank with Type-1 and Type-2 fuzzy logic, *2013 Joint IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting (IFSA/NAFIPS)* (x): 1062–1067.
- Elfes, A. (1987). Sonar-based real-world mapping and navigation, *IEEE Journal on Robotics and Automation* **3**(3): 249–265.
- Hagras, H. (2004a). A Hierarchical Type-2 Fuzzy Logic Control Architecture for Autonomous Mobile Robots, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* **12**(4): 524–539.
- Hagras, H. (2004b). A type-2 fuzzy logic controller for autonomous mobile robots, *2004 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE Cat. No.04CH37542)* **2**: 965–970.
- Hu, Y. and Lee, C. (2005). A case study of mobile robot's energy consumption and conservation techniques, *ICAR '05. Proceedings., 12th International Conference on Advanced Robotics, 2005.* pp. 492–497.
- Kim, C.-J. and Chwa, D. (2015). Obstacle Avoidance Method for Wheeled Mobile Robots Using Interval Type-2 Fuzzy Neural Network, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* **23**(3): 677–687.
- Mendel, J. M., Hagras, H., Tan, W.-W., Melek, W. W. and Hao Ying (2014). *Introduction To Type-2 Fuzzy Logic Control Theory And Applications*, Wiley, New Jersey.
- Rohmer, E., Singh, S. P. N. and Freese, M. (2013). V-REP: A versatile and scalable robot simulation framework, *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, pp. 1321–1326.
- Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R. and Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to autonomous mobile robots*, second edn, MIT Press.
- Silva, W. A. S., Rabelo, R. A. L. and Santana, A. M. (2014). Safe autonomous navigation with a wall-following robot using interval Type-2 Fuzzy System in uncertain environments, *2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, IEEE, pp. 1222–1225.
- Wagner, C. (2013). Juzzy - A Java based toolkit for Type-2 Fuzzy Logic, *2013 IEEE Symposium on Advances in Type-2 Fuzzy Logic Systems (T2FUZZ)*, IEEE, pp. 45–52.
- Yamauchi, B. (1997). A frontier-based approach for autonomous exploration, *Proceedings 1997 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation CIRA'97. 'Towards New Computational Principles for Robotics and Automation'*, IEEE Comput. Soc. Press, pp. 146–151.
- Yang-zhi, S., Shi-de, X., Meng-jie, H. and Shao-fei, P. (2015). Study on obstacle avoidance for intelligent robot based on hierarchical fuzzy control, *2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*, IEEE, pp. 525–528.