

Controle Fuzzy de um Sistema Auxiliar de Navegação de um Robô Ambiental Híbrido

Cristhian J. Gómez¹, Marley Vellasco¹ e Ricardo Tanscheit¹

¹Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio
Rua Marquês de S. Vicente, 225
22451-900 Rio de Janeiro, RJ - Brasil

cristhian.julian@hotmail.com, {marley, ricardo}@ele.puc-rio.br

Resumo. Apresenta-se, neste artigo, o desenvolvimento completo de um sistema de navegação auxiliar baseado na Lógica Fuzzy para um robô móvel denominado Robô Ambiental Híbrido Médio (RAHM). Apresenta-se também o projeto eletrônico e a programação do sistema de navegação. O desempenho deste sistema é avaliado frente ao do Sistema Principal de Navegação do RAHM.

Palavras-Chave— Lógica Fuzzy; Navegação; Robótica autônoma; Controle.

1 Introdução

Embora o uso de manipuladores e sistemas de automatização em fábricas e montadoras exista há algum tempo, pesquisas em robótica intensificaram-se a partir dos anos 90, principalmente no que tange à percepção e à inteligência. Os significativos avanços na área computacional tem possibilitado, inclusive, a realização de operações em tempo real com protótipos móveis para inspeção e exploração em zonas perigosas ou de difícil acesso para um ser humano [1].

Atualmente, a indústria brasileira vem desenvolvendo novos métodos robotizados para as tarefas de monitoramento e inspeção de gasodutos. No caso particular do gasoduto Coari-Manaus, foi desenvolvido o Robô Ambiental Híbrido Médio (RAHM) [2], resultado da evolução de um protótipo robótico capaz de se locomover nos terrenos lá encontrados. O RAHM é dotado de um Sistema Primário de Navegação (SPN) e carecia de um Sistema Auxiliar de Navegação (SAN) para uso em caso de falha.

Técnicas de inteligência computacional, especialmente a Lógica Fuzzy, têm sido utilizadas com êxito no campo da robótica [3]. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um Sistema de Navegação Auxiliar baseado na Lógica Fuzzy, de forma a permitir a navegação autônoma do robô em caso de falha do SPN. O trabalho envolveu o projeto da eletrônica e de um Sistema de Inferência Fuzzy para oferecer um controle adequado à navegação do robô em casos de emergência. O SAN é avaliado por meio de um estudo de caso comparativo, verificando-se também a relação custo-benefício de cada sistema de navegação.

2 Robô Ambiental Híbrido

Dada a necessidade de monitoramento ambiental do gasoduto Coari-Manaus, o Laboratório de Robótica do CENPES/PETROBRAS, em parceria com a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), desenvolveu de 2005 a 2011 o Robô Ambiental Híbrido (RAH) [1], que deveria satisfazer os requisitos exigidos pelo ambiente amazônico, com capacidade de se movimentar na lama, na água e em terrenos irregulares, além de possuir equipamentos para a coleta de informação.

O Robô Ambiental Híbrido (RAH) foi construído de forma a comprovar a viabilidade técnica e operacional da utilização de robôs móveis para o monitoramento do gasoduto Coari-Manaus (Fig. 1). Ao longo dos testes realizados na floresta amazônica, o RAH demonstrou ser capaz de se deslocar nos vários terrenos lá encontrados (terra firme, pântano, lama, areia e brejos) e também na água [2] – podendo ser empregado na coleta de amostras da fauna e flora local –, de efetuar medições de parâmetros físico-químicos do meio e ainda de detectar níveis de gás metano em regiões alagadas por construções de hidroelétricas.



Fig. 1. Protótipo RAH 2011. Fonte: Relatório Ativatec.

A nova versão do RAH, com aprimoramentos nas partes mecânica e eletrônica e, principalmente, na capacidade de navegação autônoma, é denominada Robô Ambiental Híbrido Médio (RAHM) (Fig. 2). A palavra “Médio” indica que o RAHM é um pouco menor do que o RAH. Ele deve ser capaz de se locomover autonomamente, de se esquivar de obstáculos e de detectar rotas mais adequadas para chegar aos objetivos estabelecidos.

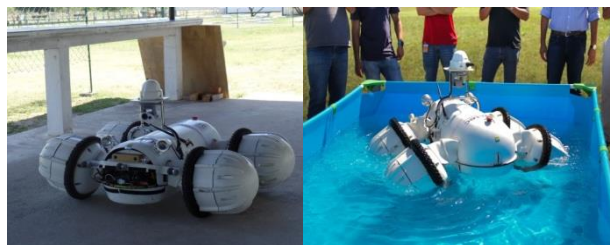


Fig. 2. Versão atual do RAHM.

3 Projeto Eletrônico do Robô Ambiental Híbrido Médio

Conforme mencionado, o RAHM é um protótipo robótico cujo objetivo principal é o monitoramento do entorno do gasoduto Coari-Manaus. De forma a proporcionar um maior grau de segurança, desenvolveu-se o SAN para atuar em situações de falha ou de emergência. Este desenvolvimento compreendeu o projeto eletrônico, seleção de equipamentos, programação, enlaces de comunicação, entre outras tarefas.

O SAN é um sistema de controle de navegação baseado na Lógica Fuzzy, implementado no computador remoto, que recebe e envia informações para o robô. O projeto é composto por dois módulos gerais (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**): o RAHM, contendo os equipamentos de aquisição e processamento de informação, os atuadores e o computador remoto no qual o Controlador Fuzzy é implementado. O módulo de sensores é encarregado de adquirir a informação do entorno do robô; o processador tem a função de codificar e interpretar esta informação. O módulo de comunicação é responsável pela troca de informações entre o robô e o computador, de forma que os atuadores cumpram com a função de locomover o robô de acordo com as saídas fornecidas pelo Controlador Fuzzy [4].

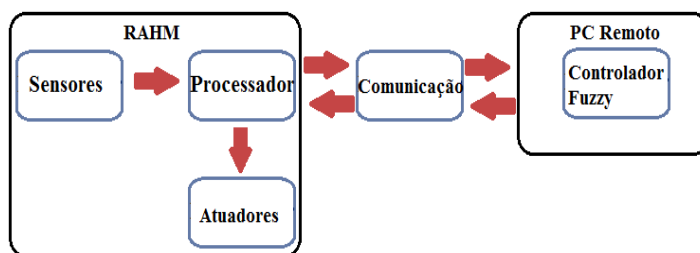


Fig. 3. Diagrama Geral Projeto Eletrônico

Os sensores utilizados são seis: cinco de ultrassom e um angular. O processador é uma placa Arduino MEGA e a comunicação entre as duas estações (robô e PC remoto) é realizada via rádio frequência. O módulo "atuadores" é composto por quatro motores de corrente contínua e quatro controladores que governam os motores.

4 Sistema Auxiliar de Navegação do RAHM

O RAHM possui três tipos de funcionamento: automático, semiautomático e teleoperado. No modo automático, o RAHM é completamente autônomo, baseando sua navegação em todos os seus sensores. No modo semiautomático, o RAHM desliga alguns de seus equipamentos e a navegação é realizada por meio de instrumentos mais simples, com o objetivo de poupar energia e recursos computacionais, tais como sensores e módulo auxiliar de processamento de informação. Por fim, no modo de teleoperação, o RAHM responde somente à tração, câmera IP e canal de comunicação, ou seja, os equipamentos vitais para que o operador possa movimentar o robô até atingir uma zona segura para inspeção e reparação.

4.1 Sistema de Inferência Fuzzy Geral

Devido ao número de variáveis consideradas no controle do robô em modo semiautomático (seis no total), optou-se pelo desenvolvimento de um sistema de inferência fuzzy hierárquico, reduzindo, assim, o número total de regras [5]. O controlador fuzzy, ou SIF Geral, é composto por dois subsistemas de inferência fuzzy: o SIF1, denominado Sistema Intermediário e identificado na Fig.4 pelo módulo "Área Frontal", e o SIF 2, denominado Sistema de Controle e identificado na Fig. 4 pelo módulo "Sistema". O primeiro tem como objetivo obter informação dos obstáculos à frente do robô, incluindo a distância a estes obstáculos e a sua orientação em relação ao objetivo. Já o SIF 2 recebe a informação de saída do sistema intermediário e, juntamente com os sensores que detectam obstáculos nas zonas laterais, fornece os valores de saída para os atuadores [6].

O SIF Geral, conforme mostrado na Fig. 4, possui seis entradas de cinco sensores de ultrassom e de um sensor angular, e duas saídas que controlam os motores de tração.

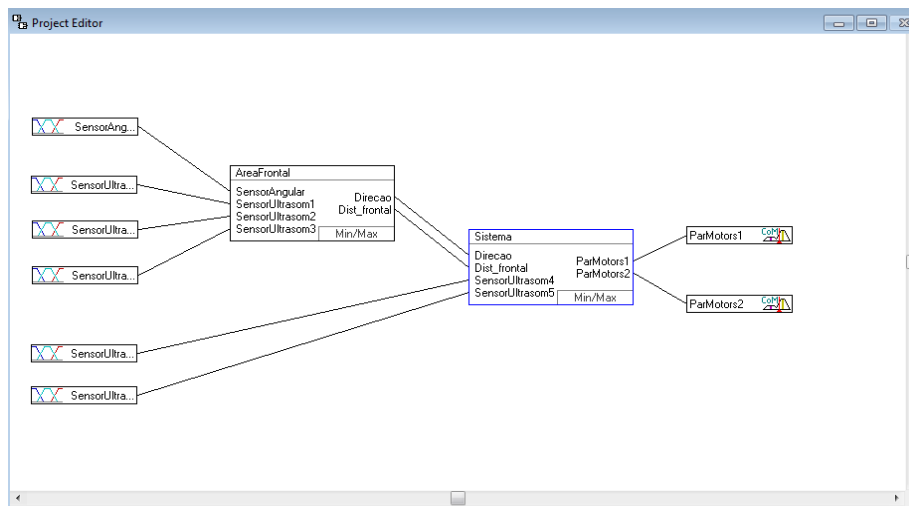


Fig. 4. Sistema de Inferência Fuzzy Geral.

O direcionamento do robô é dado pela diferença de velocidade angular entre os pares de motores do lado esquerdo e os pares de motores do lado direito. São necessárias, portanto, duas saídas: uma saída envia o mesmo valor para os dois motores do lado esquerdo (PM1) e a outra envia a informação para os dois motores do lado direito (PM2), conforme mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Assim, a curva é determinada pela diferença de velocidades angulares entre PM1 e PM2 [7].

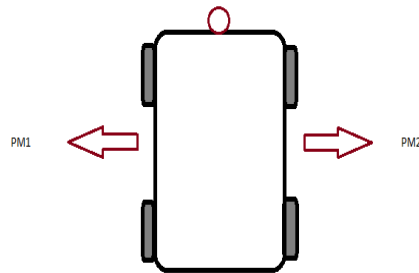


Fig. 5. Pares de motores.

4.2 SIF1: Sistema Intermediário

Para a navegação do robô, é vital a informação obtida na sua parte frontal. Assim, três dos cinco sensores de ultrassom são colocados na frente do robô. Com a informação destes três sensores, juntamente com a do sensor angular, o robô é capaz de desviar de obstáculos e, ao mesmo tempo, enviar ordens para que o protótipo siga a rota até o objetivo preestabelecido. A partir das informações destes quatro sensores, o SIF intermediário (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) fornece como saídas a orientação a ser seguida pelo robô e a distância média geral dos obstáculos na zona frontal.

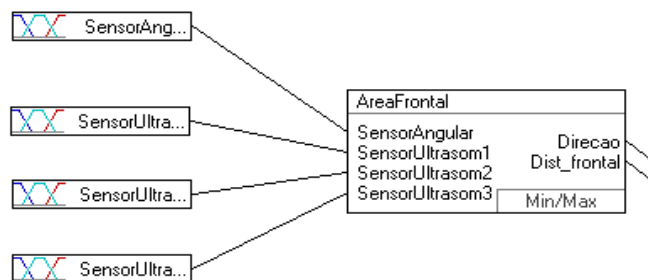


Fig. 6. Sistema Intermediário.

As duas saídas intermediárias “direção” e “distância frontal” são defuzzificadas e utilizadas como entradas do SIF2 (Sistema de Controle).

Variáveis de Entrada do SIF Intermediário.

Os sensores de ultrassom oferecem a informação de distância de qualquer obstáculo que seja detectado em uma faixa de 30 cm a 5 metros na linha de visão do robô. O sensor angular fornece o ângulo de desvio em relação a um alvo especificado previamente, ou seja, a orientação da frente do robô em relação ao objetivo. Apresentam-se a seguir os termos linguísticos e os conjuntos fuzzy, definidos por funções de pertinência, correspondentes às variáveis de entrada consideradas.

- **Distância ao Obstáculo:** os termos linguísticos e as funções de pertinência para as três entradas do SIF (dados de três sensores) intermediário que dizem respeito à distância do obstáculo são mostradas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

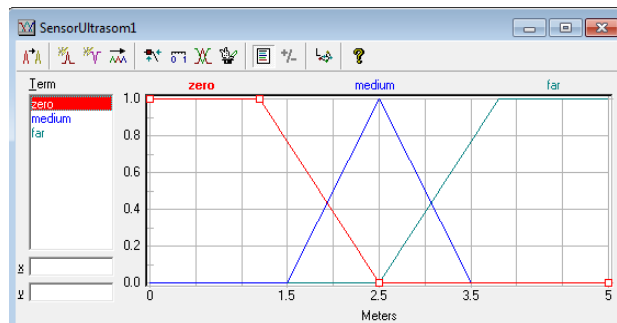


Fig. 7. Distância ao Obstáculo.

- **Ângulo de Desvio:** os cinco termos linguísticos e as funções pertinência correspondentes ao ângulo de desvio são mostradas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

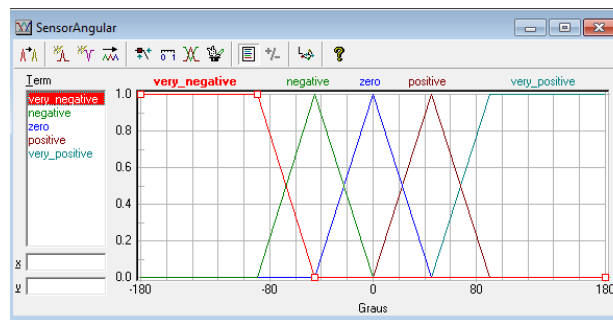


Fig. 8. Ângulo de desvio.

Variáveis de Saída do SIF Intermediário

As saídas do SIF1 são: distância média em relação ao obstáculo que se encontra à frente do robô (Distância Frontal) e ângulo de direção que o robô deve seguir para manter a sua trajetória até a posição desejada.

Para a saída Distância Frontal, os termos linguísticos e funções de pertinência são idênticos aos utilizados para as entradas relativas à distância (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Para a saída Direção, os termos linguísticos e as funções de pertinência são iguais aos mostrados na Figura 8 para a variável de entrada Ângulo de Desvio.

Base de Regras do SIF Intermediário.

O número de regras possíveis para o SIF1 é 135, já que ele recebe três informações de distância, com três termos linguísticos cada, e uma do sensor angular, com cinco termos linguísticos; um exemplo de uma regra é apresentado abaixo:

Se ultrasom1 é perto e ultrasom2 é médio e ultrasom3 é médio e ângulo é muito_negativo então a direção é muito_positiva e a distância é média.

4.3 SIF2: Sistema de Controle

Este sistema recebe como entradas os valores defuzzificados do SIF1, além das informações dos sensores localizados nas zonas laterais do robô, e fornece na saída a informação para os pares de motores. **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta a estrutura do SIF2, com suas quatro entradas e duas saídas.

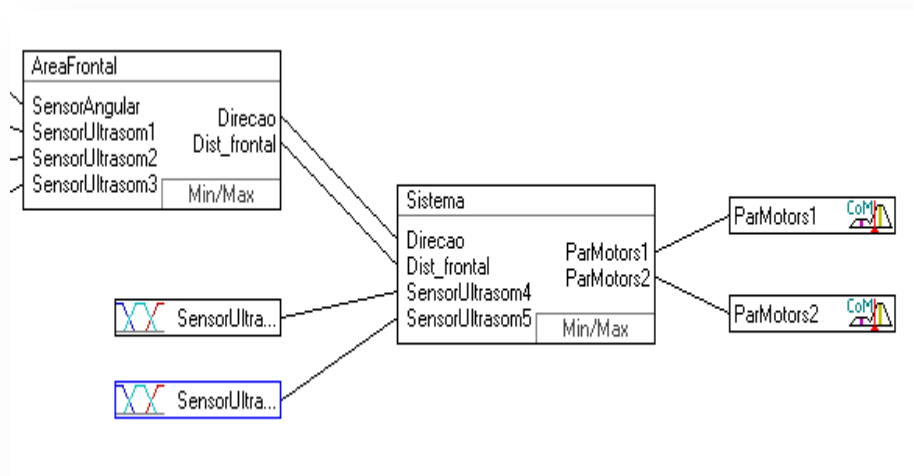


Fig. 9. Sistema de Inferência 2 (Sistema de Controle).

Variáveis de Entrada do Sistema de Controle

Como mencionado, são quatro as variáveis de entrada deste sistema:

- Distância Frontal e Direção: fornecidas pelo sistema intermediário, possuem as características apresentadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, respectivamente.
- Distâncias ao Obstáculo: fornecidas pelos sinais dos sensores de ultrassom localizados nas laterais direita (sensor ultrassom 4) e esquerda (sensor ultrassom 5), possuem as mesmas características dos sensores de ultrassom do SIF intermediário.

Variáveis de Saída do Sistema de Controle

Conforme mencionado, o SIF 2 fornece as duas saídas que serão utilizadas para acionar o par de motores ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Os atuadores das rodas de tração recebem um valor entre -5000 e 5000, proporcional ao sinal de tensão fornecido para o motor de tração. O sinal positivo ou negativo informa o sentido de rotação do motor, que corresponde ao movimento para frente ou para trás do robô. A velocidade do robô é dada pela velocidade angular dos motores, proporcional ao sinal recebido nos atuadores – 5000 é a velocidade máxima do robô e zero é a velocidade mínima. A velocidade máxima do robô é de 1m/s.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** são apresentados os termos linguísticos e as funções de pertinência da variável de saída do SIF 2. O universo de discurso, determinado pelos atuadores, é de -5000 a +5000. A distribuição assimétrica das funções de pertinência ao longo do universo deve-se à necessidade de se ter um controle mais fino quando o protótipo se movimenta para frente. Quando o robô se encontra totalmente bloqueado por obstáculos à frente e nas laterais, ele deve se deslocar para trás até alcançar uma região mais livre. Neste caso, o controle não necessita ser tão fino.

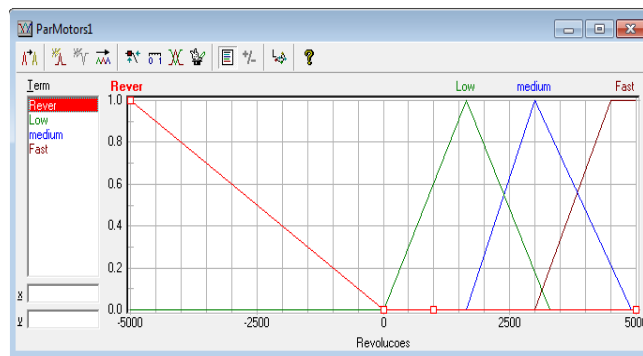


Fig. 10. Variável de saída.

Base de Regras do SIF 2 (Sistema de Controle)

A exemplo do SIF Intermediário, o número de regras possíveis é 135; a seguir apresenta-se um exemplo de regra:

Se distância é perto e direção é muito positiva e ultrasom4 é médio e ultrasom5 é longe então PM1 é rápido e PM2 é lento.

Defuzzificação

Para os dois SIFs, utilizou-se o método de centro dos máximos.

Implementação do SIF em Visual Studio

O SIF hierárquico foi programado em uma plataforma que permitia a sua conexão com os dispositivos existentes no projeto eletrônico [8]. Escolheu-se a ferramenta Visual Studio [9], que apresenta os seguintes requisitos fundamentais para a programação do SIF:

- Possui componente para receber dados através da porta ethernet, já que os dados obtidos pelos sensores são enviados por radio frequência ao PC remoto, o qual os recebe pela porta ethernet.
- Possui componente para enviar dados através da porta serial, pois as ordens de controle dadas pelo controlador fuzzy são enviadas aos atuadores das rodas através da placa conversora RS232/Ethernet pela porta serial.
- Permite o desenvolvimento de uma interface gráfica para o monitoramento de todas as variáveis de entrada e saída.
- Possui biblioteca de Lógica Fuzzy na ferramenta.

De forma a realizar o monitoramento de todas as informações do robô em tempo real, foi desenvolvida uma interface em Visual Studio, conforme mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**1. Na parte esquerda da interface tem-se uma imagem do RAHM, com a distribuição dos cinco sensores de ultrassom (três frontais e dois laterais) e seus respectivos valores. Já na parte inferior do lado esquerdo, pode-se visualizar o dado recebido do sensor angular. Na parte central, é possível visualizar os dois valores de saída do SIF intermediário: direção e a distância média da zona frontal. Na parte direita, a imagem ilustra o monitoramento dos dados enviados para os quatro atuadores das rodas. A localização de cada caixa corresponde à localização real do atuador .

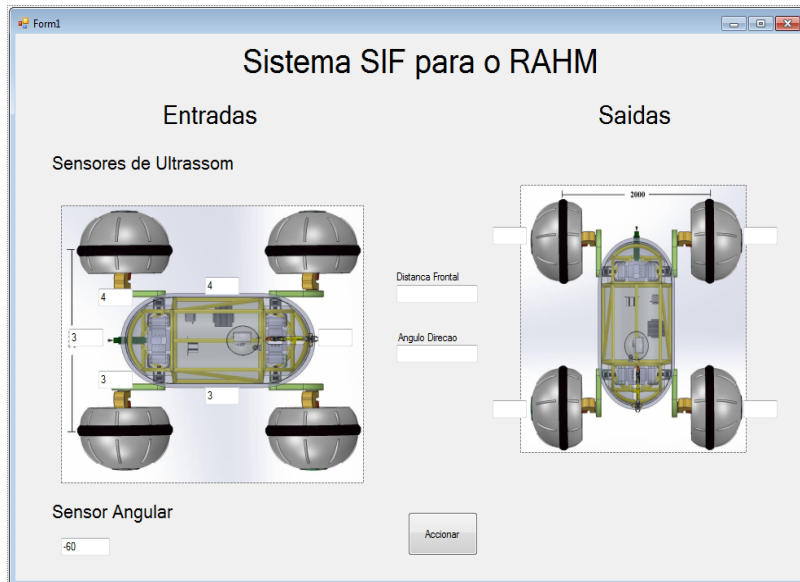


Fig. 11. Interface Gráfica de monitoramento.

5 Experimentos e Resultados

Para avaliar o comportamento do Sistema de Navegação Auxiliar (baseado na Lógica Fuzzy e implementado no RAHM), em comparação ao do sistema de navegação primário, foram criados dez cenários controlados (distribuições de obstáculos). Esta comparação envolveu itens como custo financeiro, custo computacional, consumo de energia, tempo de percurso e fluxo de dados, de forma a se avaliar a relação custo benefício de cada um deles. Os dez experimentos foram realizados em um mesmo ambiente plano, de 50m x 30m, com diferentes configurações de obstáculos. O protótipo deveria completar o trajeto até o ponto final especificado, esquivando-se de todos os obstáculos existentes.

Apresenta-se na Fig. 12 o resultado de um dos dez experimentos, em que as diferentes trajetórias foram extraídas de vídeos: SPN (linha laranja); SAN (linha azul). Consideram-se, neste caso, três obstáculos distribuídos de forma que seja indiferente a escolha, pelo robô, da rota a seguir (pelo lado esquerdo ou direito). O robô, quando controlado pelo SAN, logrou chegar ao objetivo, embora sem percorrer a rota mais eficiente.

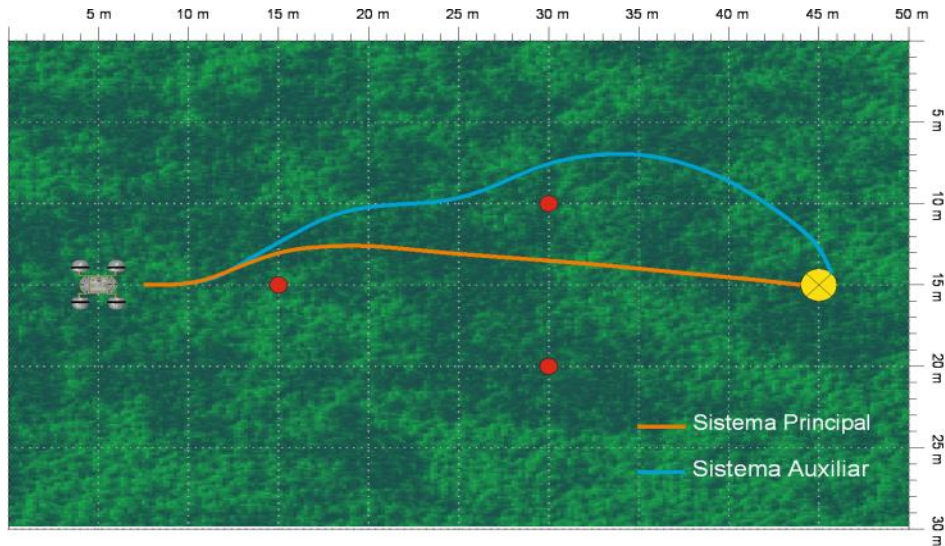


Fig. 12. Experimento com o SPN e o SAN

5.1 Comparação dos Sistemas de Navegação.

Fazendo uso as métricas descritas anteriormente, a Tabela 1 apresenta os resultados comparativos para cada sistema de navegação. No caso do SAN, é monitorada apenas a memória do PC remoto, identificado na tabela com a sigla PR; no caso do SPN, monitoram-se tanto a memória do PC embarcado (PE) como a do PC remoto (PR). Percebe-se que o SAN não satura a placa de rede, pois faz uso de apenas uma fração do seu poder. Além disso, a memória do PC remoto é utilizada em 50%, já levando em conta o custo computacional da execução do controlador fuzzy programado em Visual Studio. O consumo de corrente do sistema é de 6,5 Amperes em média.

No caso do SPN, observa-se um maior consumo de corrente, tempos mais curtos para realizar os diferentes experimentos e saturação bastante alta tanto no computador embarcado como na placa de rede para a comunicação.

Tabela 1. Comparação entre o SAN e o SPN

Tempo (seg)		Consumo de corrente (mA)		Corrente X tempo (mA/h)		Custo Computacional (%)		Dados na Rede (%)	
SAN	SPN	SAN	SPN	SAN	SPN	SAN	SPN	SAN	SPN
1:43	1:32	6468	10415	185,05	266,16	51% PR	76% PE 65% PR	12,8%	76%
2:04	1:30	6820	10115	234,91	252,87	48% PR	81% PE 67% PR	12,5%	82%
2:07	1:28	7430	10815	262,11	225,31	49% PR	80% PE 67% PR	13%	82%
1:27	1:15	7115	10085	171,94	210,1	52% PR	78% PE 65% PR	11,6%	86%

2:10	1:10	6680	10225	241,22	198,81	51% PR	90% PE 64% PR	14,3%	78%
1:03	55	6955	10180	121,71	155,52	51% PR	83% PE 63% PR	12,8%	80%
1:08	1:00	6200	9980	117,11	166,33	46% PR	77% PE 66% PR	11,9%	85%
-----	52	-----	10345	-----	149,42	-----	86% PE 73% PR	-----	82%
1:35	1:12	7050	10280	186,04	205,6	50% PR	82% PE 64% PR	12,7%	78%
1:48	1:10	6650	9720	199,5	189	47% PR	84% PE 64% PR	12,5%	75%

Destacam-se, na Tabela 1, os itens com melhor resultado para os sistemas utilizados. Percebe-se que o SAN é um sistema menos eficiente em relação ao tempo de percurso, mas necessita de apenas um pouco mais da metade da energia requerida pelo SPN, além de não saturar nem a rede nem o computador necessário para o controlador fuzzy.

Os dez experimentos, além de avaliar o sistema auxiliar de navegação, foram importantes para testar o RAHM de forma geral, depurar todos os sistemas e encontrar problemas específicos que poderiam ser aprimorados. Foi encontrado, por exemplo, um problema mecânico – roda dianteira direita mecanicamente freada – que ocasionava um maior consumo de corrente quando o robô girava para a direita. Outro problema encontrado foi a saturação da placa de rede quando usada pelo SPN, configurando-se em um risco que poderia causar perda de comunicação.

6 Conclusões

Este artigo apresentou um sistema de controle fuzzy para o Sistema Auxiliar de Navegação do Robô Ambiental Híbrido Médio, com as seguintes características: baixo consumo de energia, baixo custo financeiro e computacional e simplicidade no projeto. Apresentou-se também o projeto de uma interface para monitorar os dados de entrada e saída, pois o controlador fuzzy é programado e executado remotamente.

Observou-se um bom desempenho do sistema desenvolvido (SAN) em um conjunto de dez experimentos, confirmando os benefícios da Lógica Fuzzy para o Sistema Auxiliar de Navegação do RAHM. Em nove dos experimentos, o SAN conseguiu atingir o objetivo, mostrando-se confiável frente às limitações de equipamento e às características desejadas.

Por não ser dotado de sensor laser – presente apenas no SPN –, que permite o mapeamento de todo o ambiente, o SAN mostrou-se, em geral, menos eficiente do que SPN em termos de trajetórias da origem ao objetivo. Por outro lado, o SAN apresenta custos bastante inferiores ao do SPN, configurando-se em uma excelente alternativa para situações de emergência.

Referências

1. Shukla, A. , Karki, H.: Application of Robotics in Onshore oil and Gas Industry - a Review - Part I. Robotics and Autonomous Systems, 75, pp. 490-507 (2016)
2. Ferreira, R., Barral, E.A.: Relatório de Reavaliação do Robô Ambiental Híbrido. Ativatec Tecnologia e Desenvolvimento, UFRJ, Rio de Janeiro, pp. 6-15 (2012)
3. Saffioti, A.: Fuzzy Logic in Autonomous Navigation. In: Driankov, D., Saffioti, A. (eds.) Fuzzy Logic techniques for Autonomous Vehicles. Studies in Fuzziness and Soft Computing, pp. 3-24, Springer-Physica Verlag (2001)
4. Cordoba, J., Rios, L., Restrepo, Y.C.: Descripción de una Plataforma Móvil Implementada para el Estudio de Técnicas Inteligentes de Navegación: Pmetin. Scientia Et Technica, Año XI, 27 (2005).
5. Mendel, J.M.: Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Directions. Prentice Hall (2001).
6. Choek, K.C., Smid, G.E., Koayashi, K., Overholt, J.L., Lescos, E.P.: A Fuzzy Logic Intelligent Control System Architecture for an Autonomous Leader-Following Vehicle. In: American Control Conference, pp. 522-526 (1997)
7. Velagic, J., Lacevic, B., Perunicic, B.: A 3-Level Autonomous Mobile Robot Navigation System Designed by using Reasoning/Search Approaches. Robotics and Autonomous Systems, 54, pp. 989-1004 (2006)
8. Simarro, R., Ricolfe, C., Navarro, J., Simó, J.: Herramienta para la Prueba de Controladores Inteligentes Aplicados a la Robótica Móvil. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Informática, Sistemas y Computadoras (2002)
9. Visual Studio Development Applications. Disponível em: <https://msdn.microsoft.com/es-es/vstudio/aa718325.aspx>. Acesso em 10/11/2014.