

VEÍCULO AUTÔNOMO COM CONTROLE DIFUSO (FUZZY CONTROL)¹

Letícia Brito de Souza FERNANDES²

Graduanda em Engenharia de Controle e Automação
IFSP/Câmpus São Paulo

Alexandre Brincalepe CAMPO³

Doutor em Engenharia Elétrica/USP
Docente do Departamento de Elétrica
IFSP/Câmpus São Paulo

RESUMO

Este artigo tem como objetivo principal apresentar o desenvolvimento de um veículo autônomo que utiliza um algoritmo de controle *Fuzzy* para se manter centralizado em uma pista composta por uma faixa preta sobreposta a uma superfície plana de cor branca. Através do uso das ferramentas de lógica de controle *Fuzzy* na plataforma de programação gráfica LabVIEW, foi possível determinar a eficácia do algoritmo utilizado, além de confirmar a facilidade da substituição dos sensores de infravermelho utilizados por uma câmera, em adição da substituição da pista simples por um ambiente que simule uma situação semelhante à de trânsito urbano real, respeitando regras de trânsito e protocolos de segurança.

Palavras-chave: *Fuzzy Control*; Controle Difuso; veículo autônomo; LabVIEW; Seguidor de Linha.

Introdução

Na década de 1980, o trabalho conjunto da equipe de robótica da universidade Carnegie Mellon, em Pittsburgh (EUA), e do projeto Prometheus (do inglês, *Programme for European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety*) foi responsável pelo desenvolvimento dos primeiros veículos autônomos dos quais se tem conhecimento (PERELMUTER, 2019). Com a evolução da robótica e da computação

¹ Trabalho resultante de Iniciação Científica. Orientador Prof. Dr. Alexandre Brincalepe Campo.

² Endereço eletrônico: leticia.b@aluno.ifsp.edu.br

³ Endereço eletrônico: brinca@ifsp.edu.br

possibilitada pelo surgimento do microprocessador, avanços significativos no desenvolvimento de veículos com direção autônoma completa foram realizados por empresas como Tesla, Google e Uber.

Veículos autônomos são caracterizados por sua capacidade de identificar o ambiente a sua volta através do uso de diversos tipos de sensores e, a partir dessas leituras, delinear de forma inteligente ações a serem tomadas diante de diferentes situações. Tais decisões são determinadas por algoritmos “baseados em modelos treinados com amostras obtidas no mundo real, em um processo que procura explorar a maior quantidade possível de exemplos” (PERELMUTER, 2019). Dessa forma, “o conjunto de sensores, processadores, rede de comunicação e software permitem o aprendizado e a tomada de decisão na condução do veículo” (BRAYER, 2019, p. 9).

Apesar dos avanços na área, a tecnologia envolvida neste tipo de veículo ainda está em seu estágio inicial, e a sua incorporação no cotidiano da sociedade ainda envolve um grande número de obstáculos, tal como problemas de legislação e infraestrutura urbana. Entretanto, com algum tempo, a popularização de veículos autônomos é inevitável.

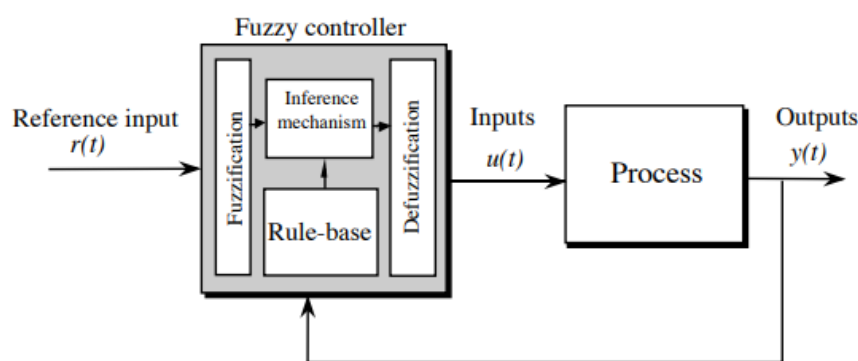
O processo de tomada de decisões mencionado anteriormente só é possível mediante a utilização de sistemas de controle, que são caracterizados como uma interconexão de componentes formando uma configuração de sistema que produzirá uma resposta desejada (DORF; BISHOP, 2001, p. 2). Esses sistemas são modelados através da criação de algoritmos, que representam de forma prática os conceitos determinados na concepção do sistema.

Neste projeto, o algoritmo utilizado para a interpretação do sinal dos sensores e a tomada de decisões diz respeito a um algoritmo de controle *Fuzzy*, ou controle difuso, em malha fechada. Um sistema de controle baseado na lógica *Fuzzy* possui, como maior vantagem, o fato de converter informações apresentadas de maneira vaga e imprecisa em dados precisos e adequados à situação-problema. Inicialmente, a lógica *Fuzzy* foi criada com o intuito de converter, em um sistema de controle, conhecimentos obtidos por especialistas em uma determinada área e expressados exclusivamente de forma linguística. Por exemplo: “se estiver quente, colocarei o ar condicionado no máximo”. Nesse caso, “quente” não significa um valor específico de temperatura ou tensão, mas pode assumir um intervalo considerável de valores para diferentes pessoas (GOMES,

2012, p. 112). Dessa forma, um sistema de controle *Fuzzy* proporciona uma metodologia formal para representar, manipular e implementar o conhecimento heurístico de um indivíduo a respeito de como controlar um sistema (PASSINO; YURKOVICH, 1998, p. 10).

O sistema em questão possui alguns componentes básicos que garantem o seu correto funcionamento e que estão representados na Figura 1.

Figura 1 — Arquitetura de um controlador *Fuzzy*



Fonte: Passino e Yurkovich (1998)

A entrada de referência (do inglês, *input*) diz respeito ao conjunto de valores, divididos em conjuntos difusos (do inglês, *fuzzy sets*), que será utilizado como entrada do controlador. Esse *input* passa, então, por um processo de fuzzificação, no qual os dados imprecisos são convertidos em informações que o mecanismo de inferência possa usar para ativar e aplicar as regras de inferência. As regras são responsáveis por quantificar as descrições linguísticas difusas a respeito de como alcançar um bom controle sobre o sistema, ou seja, por criar relações adequadas entre os conjuntos de entrada e saída. Essas regras são, então, aplicadas ao mecanismo de inferência, que emula a decisão do especialista baseado em quão bom deveria ser o controle para um determinado processo (GOMES, 2012, p. 114).

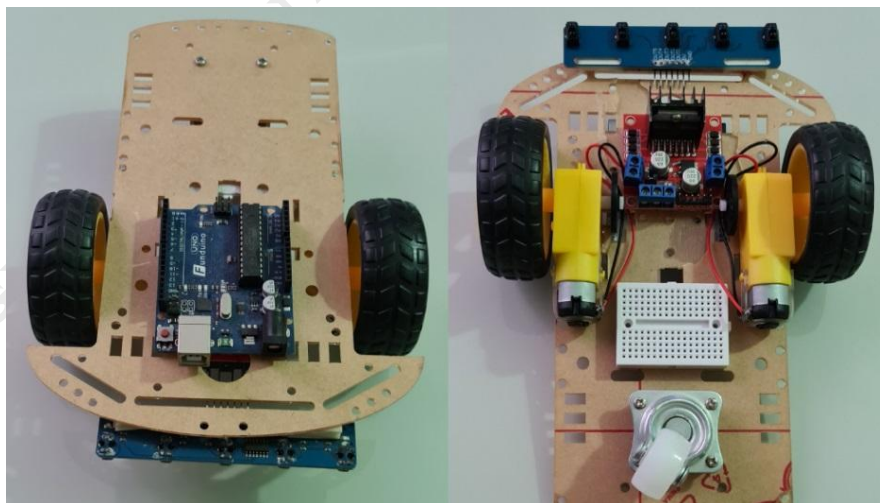
Por fim, a saída do mecanismo de inferência passa por uma etapa de defuzzificação, na qual ocorre a conversão da conclusão atingida pelo sistema em valores que possam ser utilizados como *input* para controlar um processo. Dessa forma, um controlador *Fuzzy* pode ser visto como um tomador de decisões artificial que opera em um sistema de tempo real (PASSINO; YURKOVICH, 1998, p. 11).

O presente projeto busca, através da montagem de um veículo autônomo e com a utilização de sensores de infravermelho sobre uma pista — que consiste em uma faixa preta posicionada sobre um fundo branco —, gerar um algoritmo de Controle Difuso (do inglês, *Fuzzy Control*) que possa ser utilizado para manter o veículo centralizado em uma pista e que, posteriormente, possa ser adaptado após a substituição da matriz de sensores de infravermelho por uma câmera responsável por coletar as informações a respeito do ambiente em situações que dupliquem circunstâncias reais de trânsito.

Metodologia

Para o desenvolvimento do projeto do veículo, em um primeiro momento, foram especificados os componentes principais a serem utilizados: dois motores DC 3-6V e circuitos de acionamento, duas rodas de tração e uma roda de eixo giratório, uma matriz de cinco sensores de infravermelho TCRT5000, além das peças necessárias para a montagem do chassi do veículo, no qual os componentes eletrônicos e mecânicos foram acoplados, como mostra a Figura 2. Os componentes citados são especificados abaixo.

Figura 2 — Veículo montado com plataforma microcontrolada (esquerda) e com motores, sensores e circuito de acionamento (direita)



Fonte: Autores

Atuadores do Robô – Motores

O projeto utilizou dois motores de 3-6V com caixa de redução e eixo duplo, como é possível perceber na Figura 2 acima. Esses motores apresentam torque de 0,35 Kgf/cm, quando funcionando com tensão de 3V, e de 0,80 Kgf/cm, quando funcionando com 6V. Além disso, sua corrente pode variar entre 190 mA (quando sem carga) e 250 mA (quando com carga máxima). A sua velocidade pode chegar a 200 rpm quando funcionando com tensão de 6V; já para o valor de carga mínima (3V), sua velocidade é de 90 rpm. Suas dimensões físicas são de 70 x 37 x 23 mm.

Os motores foram acoplados ao chassi do veículo e, em conjunto com as rodas, utilizados como tração frontal, direcionando o movimento do veículo de acordo com a leitura dos sensores. A roda traseira do veículo possui eixo giratório e não foi acoplada a um motor, de modo que não interferiu no direcionamento do veículo durante o trajeto.

Sensores do Robô - Matriz de sensores TRCT5000

A matriz de sensores utilizada é composta por um conjunto de cinco sensores reflexivos TCRT5000, constituídos por um led emissor infravermelho e por um fototransistor (receptor infravermelho), que pode ser observado na imagem da direita, na Figura 2. O seu funcionamento consiste na emissão de um sinal infravermelho [do inglês, *Infrared* (IR)] pelo emissor, que é refletido caso entre em contato com um objeto refletor após a emissão. Caso a reflexão do sinal ocorra, esta é percebida pelo fototransistor, que envia um sinal *LOW* para o microcontrolador.

A pista utilizada no projeto é constituída por uma faixa preta posicionada sobre uma superfície plana de cor branca. Nesse caso, os sensores, posicionados acima da pista, emitem um sinal de nível lógico zero (*LOW* - 0) ao microcontrolador caso estejam sobre a superfície branca refletora do sinal. Entretanto, ao serem posicionados sobre a faixa preta, na qual não há reflexão do sinal IR, os sensores emitem ao microcontrolador um sinal de nível lógico alto (*HIGH* - 1).

Por se tratar de uma matriz com cinco sensores, foi possível a criação de combinações dos sinais enviados ao microcontrolador, que foram, então, usadas como entrada para o algoritmo de controle, que será explorado no decorrer do artigo.

Algoritmo de Controle Difuso (*Fuzzy Control*)

O algoritmo criado para o projeto tem como objetivo manter o veículo centralizado na faixa preta durante todo o trajeto, de modo que não ocorram desvios de rota que façam com que o veículo passe a não localizar a faixa. Além disso, a centralização do robô resulta que velocidades maiores possam ser alcançadas enquanto se mantém o trajeto determinado.

O algoritmo possui, como variáveis de entrada e de saída, respectivamente, um erro, dependente do estado dos sensores, e um incremento, usado para calcular o sinal modulado em largura de pulso [do inglês, *Pulse Width Modulation (PWM)*] aplicado aos motores.

Análise de sinal do erro

O valor do erro é obtido através da combinação dos estados dos sensores na matriz, e pode assumir valores discretos num intervalo de -4 a 4, com intervalos unitários. Como destacado anteriormente, cada um dos sensores envia um valor de nível lógico alto (*HIGH* - 1) ou baixo (*LOW* - 0) ao microcontrolador, para indicar se a faixa preta está ou não sendo detectada.

Dessa forma, cada uma das combinações possíveis dos estados dos sensores foi transformada em um valor de erro correspondente, como é mostrado na Tabela 1. Durante os testes realizados com a matriz, foi notado que não é possível que mais de dois sensores detectem a faixa ao mesmo tempo, de modo que as combinações correspondentes a esses casos foram deixadas de lado.

Tabela 1 — Valores de erro para diferentes combinações de estado dos sensores

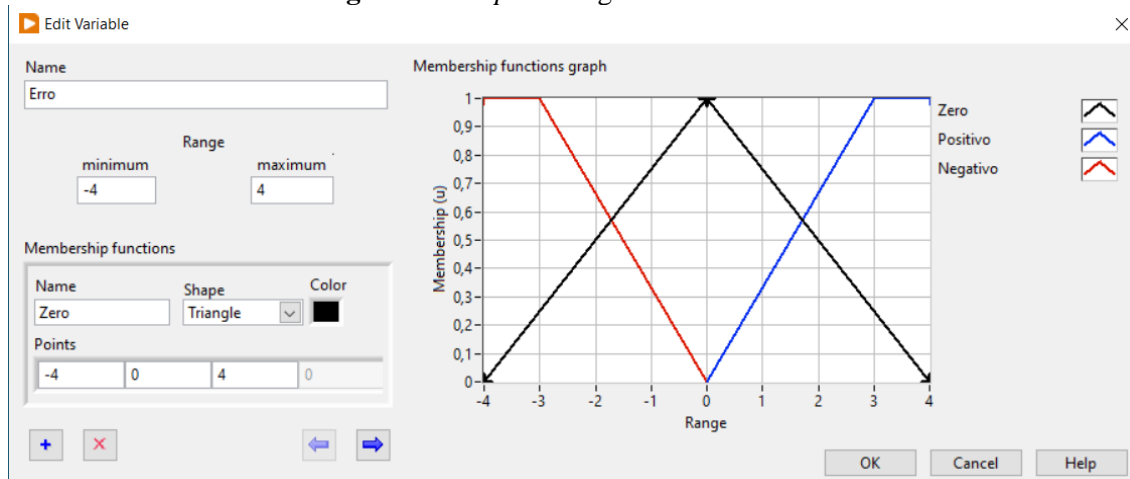
Estado do sensor 1	Estado do sensor 2	Estado do sensor 3	Estado do sensor 4	Estado do sensor 5	Erro
1	1	1	1	0	-4
1	1	1	0	0	-3
1	1	1	0	1	-2
1	1	0	0	1	-1
1	1	0	1	1	0
1	0	0	1	1	1
1	0	1	1	1	2
0	0	1	1	1	3
0	1	1	1	1	4

Fonte: Autores

Como é possível observar na Tabela 1, o valor de erro é zero quando apenas o sensor 3 encontra-se sobre a faixa, o que significa que não há desvio de rota e que nenhuma ação precisa ser tomada com o intuito de centralizar o veículo. De forma análoga, o erro -4 indica o maior desvio possível à esquerda (desde que a faixa ainda esteja sendo detectada) e o valor de erro 4, o maior desvio possível à direita.

Após a transformação do estado dos sensores em um valor de erro correspondente, o intervalo de valores assumidos pelo erro foi refletido em um *input*, que foi utilizado como parâmetro de entrada do algoritmo, como mostra a Figura 3.

Figura 3 — *Input* do algoritmo de controle



Fonte: Autores

Na imagem acima, é possível notar que a variável de entrada do algoritmo de controle difuso (*input* “Erro”) apresenta três conjuntos difusos (do inglês, *fuzzy sets*): “Positivo”, “Negativo” e “Zero”. Os dois primeiros conjuntos (do inglês, *sets*), como os nomes indicam, incluem, respectivamente, apenas os valores positivos e negativos do erro, enquanto o conjunto “Zero” abrange todos os valores entre -4 e 4. O objetivo da inclusão deste conjunto é garantir que, durante a medição da variável “Erro”, não haja nenhuma mudança abrupta de valores de pertinência entre os valores positivos e os negativos do erro, que possa resultar em discrepâncias ou variações abruptas na variável de saída do algoritmo.

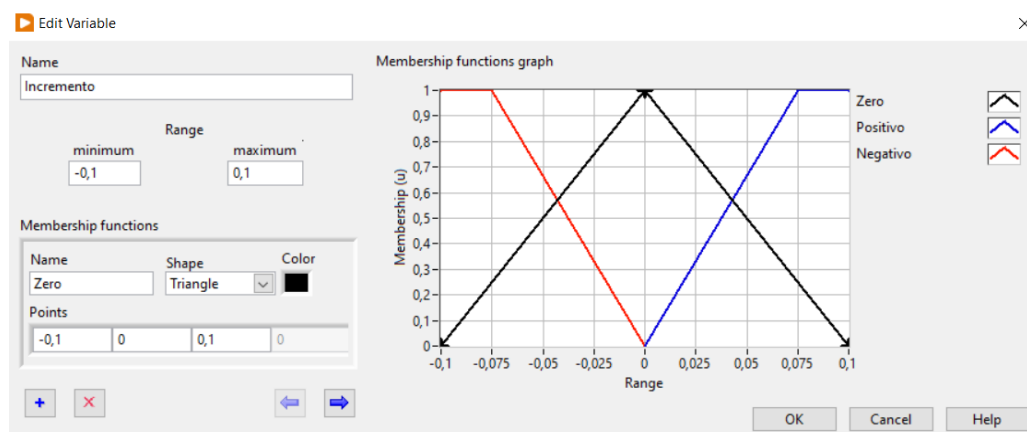
Com a adoção de uma variável de erro, do modo como foi elaborada, é possível determinar a localização do veículo sobre a pista, desde que pelo menos um dos sensores esteja detectando a presença da faixa preta, o que possibilita, por sua vez, controlar os motores por meio do incremento e manter o veículo centralizado no trajeto em todos os momentos de seu funcionamento.

Sinal de comando do Atuador – Sinal Incremento

A variável de saída, denominada “Incremento”, é determinada por meio das regras de inferência, que serão exploradas na próxima seção. O seu valor pode variar no intervalo de -0,1 a 0,1. Esses valores foram escolhidos de modo a evitar que o PWM aplicado aos motores chegasse a zero em qualquer momento e a roda deixasse de girar,

o que prejudicaria o sistema de controle de trajetória do veículo. Essa variável foi determinada como saída (do inglês, *output*) do algoritmo de controle, como mostra a Figura 4.

Figura 4 — *Output* do algoritmo de controle



Fonte: Autores

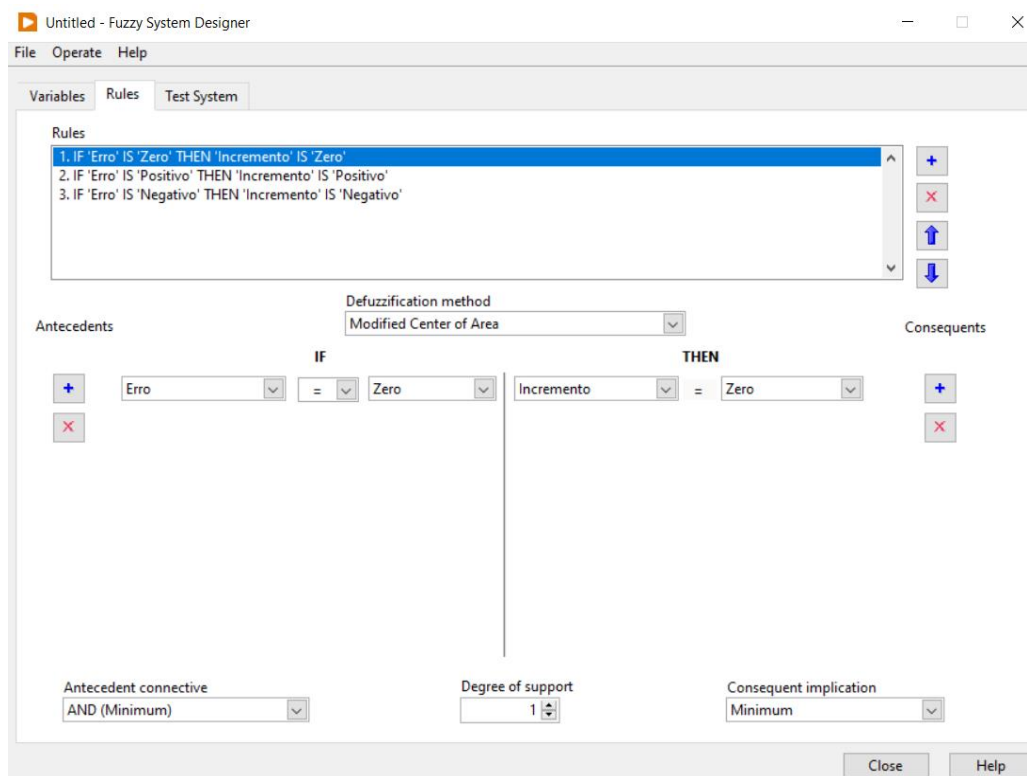
Na imagem acima, nota-se que o *output* apresenta três conjuntos difusos (do inglês, *fuzzy sets*): “Positivo”, “Negativo” e “Zero”, que se comportam de forma semelhante aos *sets* determinados para a variável de entrada “Erro”.

As regras de inferência, que serão exploradas abaixo, são responsáveis por determinar os valores de incremento com base no valor de entrada do erro. Esse valor é, então, enviado aos motores como incremento do sinal PWM aplicado aos motores, o que diminui ou aumenta a velocidade das rodas, possibilitando o controle da direção do veículo.

Regras de inferência

As regras de inferência relacionam um valor de erro na entrada com um valor de incremento na saída do algoritmo. As regras utilizadas no projeto em questão são apresentadas na Figura 5.

Figura 5 — Regras de inferência do algoritmo de controle



Fonte: Autores

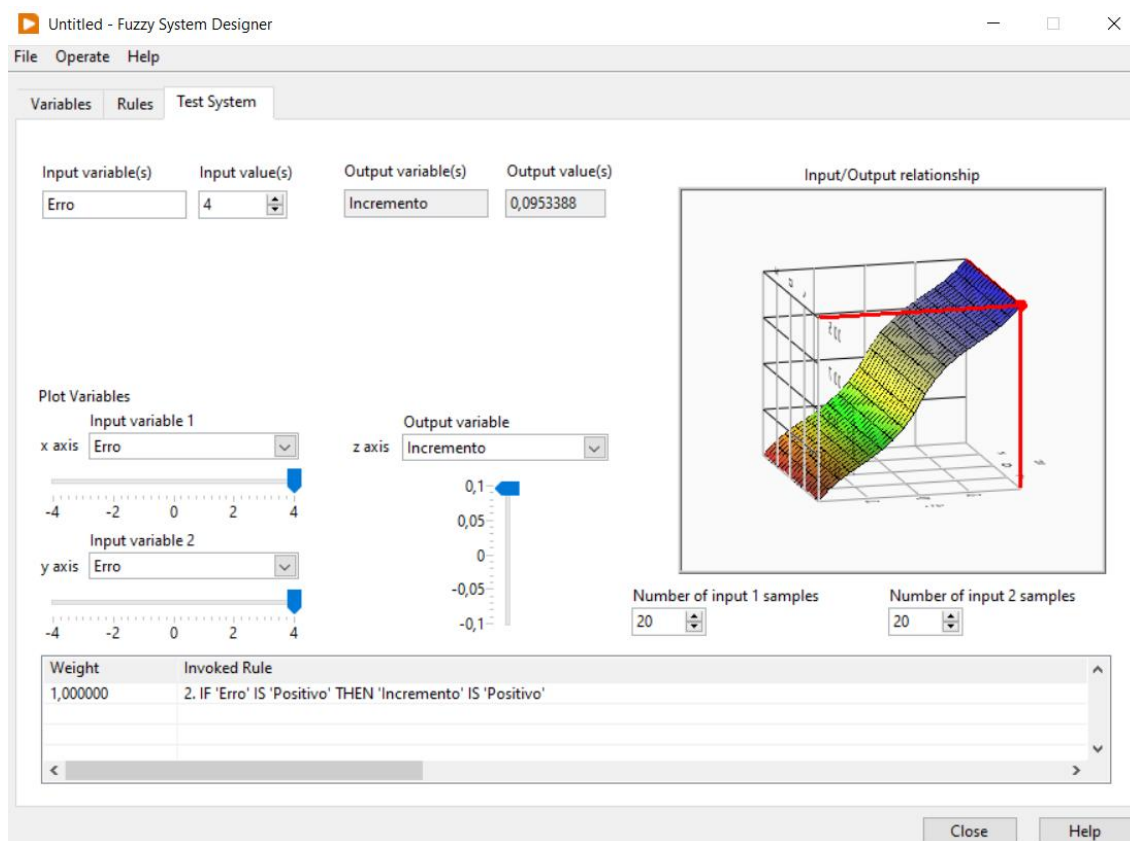
Como é possível perceber na figura, as regras determinam que, para um erro positivo, ou seja, para um desvio à direita, a saída é um incremento positivo, de modo que a roda esquerda gira com velocidade menor do que a direita, fazendo com que o veículo seja direcionado para o centro da faixa. De modo semelhante, um erro negativo gera um incremento negativo. Entretanto, um erro zero indica que não há desvio em nenhuma direção, de modo que um incremento de valor zero é enviado ao sinal PWM dos motores, mantendo a sua direção inicial.

Todo o código de programação para o funcionamento do veículo foi criado usando a ferramenta de programação gráfica NI LabVIEW, que apresenta, como uma de suas várias funcionalidades, uma seção de controle *Fuzzy*, na qual é possível a criação de conjuntos (do inglês, *sets*) de entrada e de saída, além da determinação de regras de inferência.

A ferramenta possibilita que o usuário selecione o método de defuzzificação a ser utilizado, o que facilita a criação dos sistemas de controle, já que os cálculos necessários nessa etapa não precisam ser considerados pelo programador. Além disso, o

LabVIEW também possui um sistema de testes, que permite que o usuário preveja o funcionamento de seu algoritmo antes de colocá-lo em funcionamento, como mostra a Figura 6.

Figura 6 — Sistema de testes do *Fuzzy designer*



Fonte: Autores

Dessa forma, é possível determinar o conjunto de *sets* a ser utilizado na entrada e na saída de forma mais rápida, sem a necessidade de realização de testes físicos para estabelecer a melhor abordagem a ser tomada.

Durante a realização dos testes com o veículo, foi utilizada a biblioteca Digilent LINX para executar a comunicação entre a plataforma LabVIEW e o microcontrolador Arduino. Essa biblioteca possui funções semelhantes às aquelas presentes na plataforma Arduino IDE, que são utilizadas para controlar o sinal de PWM dos motores e para estabelecer os *pins* a serem utilizados na placa.

Apesar de útil para projetos de bancada, a biblioteca LINX não permite que o código criado em linguagem LabVIEW seja embarcado no Arduino. Dessa forma, para

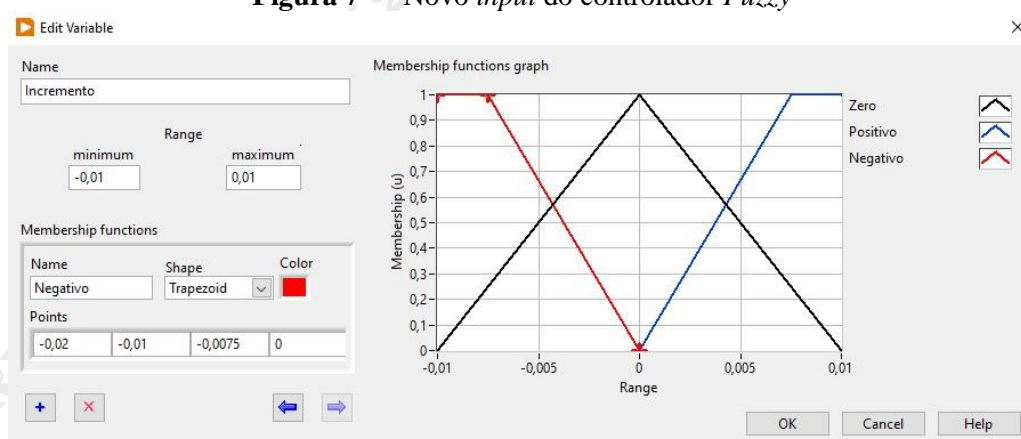
que o projeto em questão permaneça válido, seria necessária a substituição do microcontrolador Arduino por um equipamento NI myRIO, um dispositivo embarcado com capacidade de processamento em tempo real que pode ser programado em LabVIEW ou C.

Resultados

Uma vez finalizadas a montagem e a programação do veículo, testes foram realizados para determinar a eficácia do algoritmo utilizado. Assim, alguns aspectos tiveram que ser modificados a partir dos resultados obtidos.

Primeiramente, o conjunto de valores determinados para o incremento em um primeiro momento abrangiam os valores de $-0,1$ a $0,1$, o que resultava que o valor do PWM nos motores chegasse aos valores mínimo e máximo (zero e um, respectivamente) muito rapidamente, e isso levava a que o veículo não agisse da maneira esperada. Para solucionar o problema, o conjunto de saída foi alterado para valores entre o intervalo $-0,01$ e $0,01$, o que melhorou o desempenho dos motores durante o trajeto. Os *fuzzy sets*, por sua vez, permaneceram os mesmos, como mostra a Figura 7.

Figura 7 — Novo input do controlador Fuzzy



Fonte: Autores

Além disso, também foi perceptível que, na matriz de sensores, era impossível que mais de dois sensores percebessem a linha ao mesmo tempo, de modo que todos os valores de erro para combinações com mais de dois sensores foram eliminados do conjunto de entrada.

Outro fator importante para a garantia do correto funcionamento do veículo foi a determinação do valor inicial do sinal de PWM dos motores. Esse valor não poderia ser igual a 1, pois isso não permitiria incrementos positivos. Também não poderia ser igual a 0, já que, dessa forma, não haveria movimento do veículo. Assim, foi determinado o valor de 0,5, ou seja, de 50% para o PWM de ambos os motores.

Após a realização das mudanças necessárias para o bom funcionamento do algoritmo, foi possível perceber que, após alguns segundos, o incremento passava a tender a um valor específico, que mantinha o veículo centralizado na linha durante o trajeto. Esse valor era, então, mantido até o final do percurso.

Com a centralização do veículo na faixa durante o trajeto, foi possível perceber que ambos os motores chegavam a valores de PWM que se aproximavam de 1, ou seja, que velocidades maiores podiam ser alcançadas sem que houvesse prejuízo na rota pré-determinada e sem que o veículo se perdesse completamente da faixa, como ocorreria caso o *Fuzzy* não fosse utilizado.

A partir dos resultados obtidos, verificou-se a eficácia de um algoritmo de controle baseado na lógica *Fuzzy* ao manter um veículo centralizado na pista, objetivo principal do projeto.

Além disso, por conta da forma como o *input* "Erro" foi elaborado, seria possível realizar a substituição da matriz de sensores de infravermelho por uma câmera, e utilizar ferramentas de reconhecimento de imagem para substituir a combinação do estado dos sensores no momento da determinação do erro.

Dessa forma, foi utilizada uma abordagem mais simples — um veículo seguidor de linha — para a elaboração de um algoritmo a ser adaptado para utilização em uma situação mais complexa, na qual o veículo terá que utilizar a câmera para se guiar em uma situação que emula o trânsito urbano, respeitando as leis de trânsito e protocolos de segurança.

Conclusão

No decorrer do artigo, foi explicada a metodologia utilizada para a criação de um veículo autônomo, com a utilização de um algoritmo de controle *Fuzzy* para mantê-

lo centralizado em uma pista composta por uma faixa preta localizada sobre uma superfície plana de cor branca.

O algoritmo utilizado possuía, como entrada (do inglês, *input*), um erro determinado pelos estados dos cinco sensores de infravermelho, dispostos em uma matriz, e, como saída (do inglês, *output*), um incremento aplicado sobre o sinal PWM dos motores com o objetivo de controlar a direção das rodas.

Assim, foi determinada a eficácia do controlador *Fuzzy* utilizado, uma vez que, durante a sua execução, foi percebido que o veículo se manteve centralizado na faixa durante o percurso, e que o valor da saída "Incremento" passava a tender a um valor ideal para que o veículo alcançasse a velocidade máxima, com o mínimo erro, durante o trajeto.

Além disso, foi averiguada a facilidade de uma possível substituição da matriz de sensores de infravermelho por uma câmera no momento da coleta de dados a respeito do ambiente e da substituição da pista utilizada por um ambiente que simule uma situação real de trânsito urbano.

Referências

BRAYER, Jorge. **Veículos autônomos**: estudo do desenvolvimento com viabilidade econômica e inteligência artificial. Brasil: Ed. Autor, 2019.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. **Sistemas de controle modernos**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2001.

GOMES, Herbert. M. Fuzzy logic for structural system control. **Latin American Journal of Solids and Structures**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 111-129, 2012. Disponível em: <https://lajss.org/index.php/LAJSS/article/view/397>. Acesso em: 19 jan. 2021.

KLIR, George J.; YUAN, Bo. **Fuzzy sets and fuzzy logic**: theory and applications. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1995.

PASSINO, Kevin M.; YURKOVICH, Stephen. **Fuzzy Control**. Ohio: Addison-Wesley Longman, 1998.

PERELMUTER, Guy. Veículos autônomos. *In*: PERELMUTER, Guy. **Futuro presente**: o mundo movido à tecnologia. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2019.

FUZZY CONTROL APPLIED TO NA AUTONOMOUS VEHICLE

ABSTRACT

This work's main objective is to present the development of an autonomous vehicle that uses a Fuzzy control algorithm to maintain itself centralized on a track composed of a black strip placed against a plain white surface. Through the use of Fuzzy control logic tools on the graphic programming platform LabVIEW, it was possible to determine the efficacy of the chosen algorithm, besides confirming the possibility of substituting the infra-red sensors currently used for a camera. In this case, the simple track previously described would be exchanged for an environment that simulates a real urban traffic situation, respecting traffic laws and security protocols.

Keywords: *Fuzzy Control; Autonomous Vehicle; LabVIEW; Line Follower.*

Envio: janeiro/2021

Aceito para publicação: fevereiro/2021