

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SISTEMAS EMBARCADOS PARA INDÚSTRIA
AUTOMOTIVA

TIAGO GONÇALVES ARAUJO

**ESTUDO DE UM SISTEMA PARA AUTOMATIZAÇÃO DE
MANOBRAS DE “DOCKING” DE VEÍCULOS LONGOS,
PRINCIPALMENTE BITRENS E RODOTRENS**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2020

TIAGO GONÇALVES ARAUJO

**ESTUDO DE UM SISTEMA PARA AUTOMATIZAÇÃO DE
MANOBRAS DE “DOCKING” DE VEÍCULOS LONGOS,
PRINCIPALMENTE BITRENS E RODOTRENS**

Monografia de Especialização, apresentada ao Curso de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, do Departamento Acadêmico de Eletrônica – DAELN, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Alceu Schneider

CURITIBA
2020



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Curitiba

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Curso de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria
Automotiva



TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO DE UM SISTEMA PARA AUTOMATIZAÇÃO DE MANOBRAS DE
“DOCKING” DE VEÍCULOS LONGOS, PRINCIPALMENTE BITRENS E
RODOTRENS

por

TIAGO GONÇALVES ARAUJO

Esta monografia foi apresentada em 05 de Março de 2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Guilherme Alceu Schneider
Orientador

Prof. Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabas
Membro titular

Prof. M. Sc. Omero Francisco Bertol
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

RESUMO

ARAUJO, Tiago Gonçalves. **Estudo de um sistema para automatização de manobras de “docking” de veículos longos, principalmente bitrens e rodotrens**. 2020. 48 p. Monografia de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

A automatização de funções e sistemas automotivos é uma das grandes tendências da indústria nas próximas décadas, juntamente com a eletrificação e conectividade. Além disso, a incessante busca pela otimização de atividades e redução de custo é uma característica presente desde o início das atividades deste setor. O mercado de veículos comerciais brasileiro é considerado muito singular se comparado ao resto do mundo, isso se deve a diferença de legislações, condições rodoviárias e combinações de transporte, principalmente no que se trata de uso em maior escala de Bitrens e Rodotrens em rodovias, característica comparável apenas ao mercado Australiano. A partir destas particularidades um sistema para automação de manobras de “docking” em veículo com 3 combinações é apresentado e discutido neste trabalho. Desde a modelagem matemática para testes virtuais, contemplando os sensores e atuadores necessários para a tarefa e a proposta de um algoritmo de controle.

Palavras-chave: Automação. Automotivo. Fuzzy. Caminhões. Docking.

ABSTRACT

ARAUJO, Tiago Gonçalves. **Study of a system for automation of docking maneuvers for long vehicles, mainly rodotrens and bitrens**. 2020. 48 p. Monografia de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

Automation of automotive functions and systems is one of industry main tendencies for the coming decades, alongside with electrification and connectivity. Furthermore, the uninterrupted seeking for optimization and cost reduction is intrinsic characteristic of this sector. The Brazilian commercial vehicles market is considered very singular if compared to the rest of the world, due to differences in legislation, road conditions and transport combinations, primarily due to larger scale usage of Bitrens and Rodotrens at highways, attribute comparable only to the Australian market. Starting from these singularities one system for automation of docking maneuvers for vehicles with 2 trailers is presented and discussed at this paper. From the mathematical modelling for virtual tests, contemplating the sensors and actuators demanded for the task and a proposal of control algorithm.

Keywords: Automation. Automotive. Fuzzy. Trucks. Docking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Linha do tempo para desenvolvimento de tecnologias ligadas a automação veicular	8
Figura 2 – Exemplo de docking	10
Figura 3 – Teorema de Ackermann	12
Figura 4 – Modelo de bicicleta.....	13
Figura 5 – Modelo caminhão em curva	13
Figura 6 – Exemplo de potenciômetro.....	15
Figura 7 – Sensor indutivo	15
Figura 8 – Motor elétrico	16
Figura 9 – Controle em malha fechada	17
Figura 10 – Modelo de controlador fuzzy	18
Figura 11 – Função de inferência trapezoidal	19
Figura 12 – Função de inferência triangular	19
Figura 13 – Primeiro exemplo de fuzzyficação	20
Figura 14 – Segundo exemplo de fuzzyficação.....	20
Figura 15 – Exemplo de controlador Mamdani.....	22
Figura 16 – Decomposição de um fuzzy complex em um HFS	23
Figura 17 – Localização dos sensors e atuadores	24
Figura 18 – Diagrama do espaço de estacionamento	25
Figura 19 – Modelo de caminhão bitrem em programação de blocos.....	27
Figura 20 – Modelo de caminhão utilizado.....	27
Figura 21 – Controlador fuzzy desenvolvido	28
Figura 22 – Funções de inferência para variável posição em y	29
Figura 23 – Funções de inferência para variável δ^2	29
Figura 24 – Funções de inferência para variável de saída.....	30
Figura 25 – Saída do controlador fuzzy quando $\delta^2 = 0$ e $x = 100$	32
Figura 26 – Trajetória do veículo.....	32
Figura 27 – Saída do controlador fuzzy quando x e $\delta^2 = 0$	33
Figura 28 – Trajetória desejada.....	33
Figura 29 – Conjuntos fuzzy da variável de entrada do segundo controlador	34
Figura 30 – Conjuntos fuzzy da variável de saída do segundo controlador	35
Figura 31 – Exemplo quando a diferença entre o ângulo desejado e o atual é zero (input = 0).....	36
Figura 32 – Exemplo quando a diferença entre o ângulo desejado e o atual é zero (input = 2.78).....	36
Figura 33 – Evolução dos ângulos entre carretas	37
Figura 34 – Raio de curva dos implementos	38
Figura 35 – Resultados obtidos.....	39
Figura 36 – Variáveis da primeira situação	40
Figura 37 – Variáveis da manobra 2	42
Figura 38 – Processo para mudança de direção da combinação.....	43
Figura 39 – Variáveis do caso 3	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Conjunto de regras fuzzy para a primeira etapa do HFS.....	31
Quadro 2 – Conjunto de regras fuzzy para a segunda etapa do HFS.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS

FEO	Fabricantes de Equipamentos Originais
MA	Malha Aberta
MF	Malha Fechada

LISTA DE SIGLAS

FEO	Fabricante de Equipamentos Originais
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HFS	<i>Hierarchy Fuzzy Structure</i>
LOM	<i>Largest Of Maximum</i>
MOM	<i>Middle Of Maximum</i>
PID	Proporcional Integral Derivativo
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SOM	<i>Smallest Of Maximum</i>
V2I	<i>Vehicle To Infraestructure</i>
V2V	<i>Vehicle to Vehicle</i>

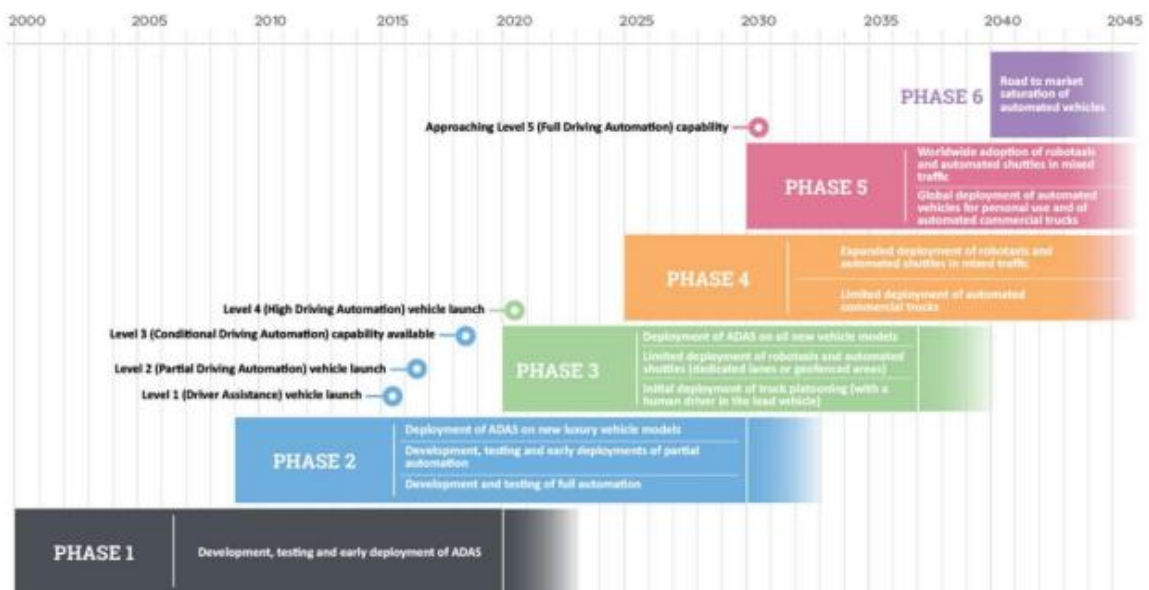
SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 PROBLEMA	9
1.2 OBJETIVOS	10
1.2.1 Objetivo Geral	10
1.2.2 Objetivos Específicos	10
1.3 JUSTIFICATIVA	11
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 DINÂMICA DE VEÍCULOS EM CURVA	12
2.2 SENSORES E ATUADORES PARA APLICAÇÃO AUTOMOTIVA	14
2.3 SISTEMA DE CONTROLE	16
2.4 CONTROLADOR LÓGICO FUZZY	17
2.4.1 Controladores Fuzzy Hierárquicos	22
3 DESENVOLVIMENTO	24
3.1 MODELO DE INSTRUMENTAÇÃO DO VEÍCULO E DO AMBIENTE	24
3.2 MODELO DE BITREM	25
3.3 DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR FUZZY	27
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	37
4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO DE CAMINHÃO	37
4.2 MANOBRA DE ESTACIONAMENTO	38
4.2.1 Manobras 1 e 4	40
4.2.2 Manobra 2	41
4.2.3 Manobras 3 e 5	43
5 CONCLUSÃO	45
REFERÊNCIAS	46
APÊNDICE A: DEFINIÇÃO DAS FUNÇÕES DE INFERÊNCIA	48

1 INTRODUÇÃO

Avaliando recentes ideias do setor automotivo é possível identificar a principais tendências do mercado automotivo para as próximas décadas. São elas a eletro mobilidade, conectividade e a automação, a Figura 1 ilustra essa tendência mostrando em uma linha do tempo as expectativas das principais FEOs (Fabricantes Equipamento Originais) para inovações no segmento.

Figura 1 – Linha do tempo para desenvolvimento de tecnologias ligadas a automação veicular



Fonte: Modi, Spulber e Jin (2018).

A *Society of Automotive Engineers* (SAE) classifica os veículos autônomos em 6 principais categorias, da SAE 0 até SAE 5 (SAE J3016, 2014):

- SAE 0: Veículos sem nenhum tipo de automação, onde todas as atividades são dependentes dos seres humanos.
- SAE 1: Assistência ao condutor, onde o veículo já é capaz de realizar atividades mais simples por conta própria, como por exemplo, veículos com transmissões automáticas ou automatizadas.
- SAE 2: Automação parcial, onde atividades mais complexas já são automatizadas, alguns exemplos seriam os sistemas para manter o veículo na sua faixa de rodagem, aceleração e frenagem automáticas, entre outros.

- SAE 3: Automação condicional, onde o veículo já será capaz de se movimentar sozinho, através do monitoramento ativo do ambiente externo, mas o motorista ainda deve retomar a direção em alguns casos, como por exemplo em situações de risco. Normalmente aplicado para ambientes fechados e controlados.
- SAE 4: Automação alta, onde o veículo é capaz de se movimentar sozinho e possui habilidades de reação para situações de risco mesmo quando o motorista não responde a solicitação para assumir o controle. O que exige um alto grau de conectividade tanto V2V (*Vehicle to Vehicle*) quanto V2I (*Vehicle to Infrastructure*).
- SAE 5: Automação completa, onde o controle humano é totalmente dispensável, e em alguns casos impossibilitado. As condições para que isso ocorra ainda não são totalmente claras.

Quando o assunto são veículos comerciais grande parte do foco está voltado para o nível de automação SAE 3, isso se deve ao fato de que são inúmeras as aplicações onde esse tipo de automóvel se encontra em ambiente confinado e previsível como: minas, construções, portos, colheitas, entre outros.

Dessa forma, é possível a total eliminação de motoristas com a utilização desse nível de tecnologia, trazendo uma otimização de custos, segurança e produtividade para o operador de frota.

1.1 PROBLEMA

Um dos principais passos para que a automação em ambientes fechados possa ser alcançada é a capacidade de realizar manobras complexas, como por exemplo o chamado “docking”. Tal manobra consiste em estacionar o veículo em uma vaga estreita para que possa ser carregado, a Figura 2 mostra um exemplo desta manobra.

Figura 2 – Exemplo de docking



Fonte: Autoria própria¹.

Controlar combinações muito extensas como bitrens e rodotrens é ainda mais difícil devido à natureza não linear do seu comportamento. Além disso, para otimizar o processo de carregamento as vagas estão se tornando cada vez menores, o que exige uma maior precisão dos motoristas para evitar danos materiais, como colisões ou atrasos.

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho, relativos ao problema anteriormente apresentado.

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema que consiste em: esquema de sensores e atuadores e controlador para “docking” de veículos longos com dois implementos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Etapas a serem realizadas para atingir-se o Objetivo Geral neste trabalho de conclusão de curso de especialização, são elas:

- Modelagem matemática do veículo.
- Desenvolvimento do esquema de atuadores e sensores necessários.
- Escolha de algoritmo para controle.
- Desenvolvimento do controlador para manobra de “docking”.

¹ Modern loading bay with overhead door, dock leveller and dock shelter. Imagem disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Loading_dock#/media/File:Modern_loading_dock.jpg>. Acesso em: 10 jan. 2020.

1.3 JUSTIFICATIVA

Um dos principais obstáculos para a eliminação da necessidade de motoristas de caminhões em operações em ambientes controlados é a automatização de manobras complexas, que dependem muito da experiência do condutor para serem concluídas com êxito. Além dos conhecidos benefícios para redução de custos de operação e otimização de processos, isso também contribuiu com o aumento da segurança, principalmente em ambientes considerados insalubres, como por exemplo, dentro de uma mina subterrânea e do bem-estar dos operadores.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Capítulo 1 - Introdução: Apresentação do objetivo geral e objetivos específicos deste trabalho, justificativa da importância da automatização de manobras e aplicação na área automotiva.

Capítulo 2 - Fundamentação Teórica: Uma introdução sobre a dinâmica em curvas de veículos com ou mais trailers. Revisão bibliográfica sobre os sensores mais comuns utilizados na engenharia automotiva. Caracterização de um controlador, e uma explicação mais detalhada sobre controladores baseados em lógica *fuzzy*.

Capítulo 3 - Desenvolvimento: Caracterização do sistema de controle, apresentando todos os sensores e atuadores necessários. Desenvolvimento de um modelo em MATLAB SIMULINK da dinâmica do problema e do controlador *fuzzy* utilizado.

Capítulo 4 - Apresentação e Análise dos Resultados: Apresentação dos resultados obtidos com a utilização do sistema proposto em várias condições de posicionamento inicial do veículo.

Capítulo 5 - Conclusão: Apresentação das conclusões sobre os resultados desse trabalho e recomendações sobre trabalhos futuros.

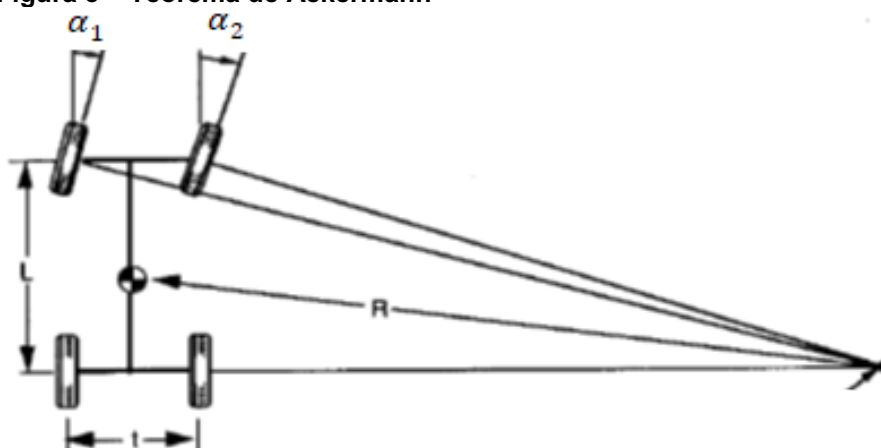
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é desenvolvida uma revisão bibliográfica da teoria utilizada para o desenvolvimento deste trabalho. Na seção 2.1 são apresentados os modelos utilizados para modelagem matemática de veículos em curva. Em 2.2 é feita uma revisão dos principais sensores e atuadores utilizados na indústria automotiva. Os sistemas de controle são explanados na seção 2.3. Por fim, em 2.4, é feita uma breve introdução aos conceitos da lógica *fuzzy*.

2.1 DINÂMICA DE VEÍCULOS EM CURVA

Segundo Gillespie (1997), para o estudo da dinâmica em curva de veículos em baixa velocidade o teorema de Ackermann, apresentado na Figura 3, é o mais indicado, pois nessa situação a deformação dos pneus, dos sistemas de suspensão e direção é desprezível. Nesse caso, as rodas dianteiras e traseiras do veículo percorrem curvas de raios diferentes, mas com o mesmo centro. Os ângulos " α_1 " e " α_2 " representam o esterçamento em graus das rodas esquerda e direita respectivamente, " L " o entre eixos do veículo, " t " a bitola e " R " o raio de curva durante a manobra ilustrada.

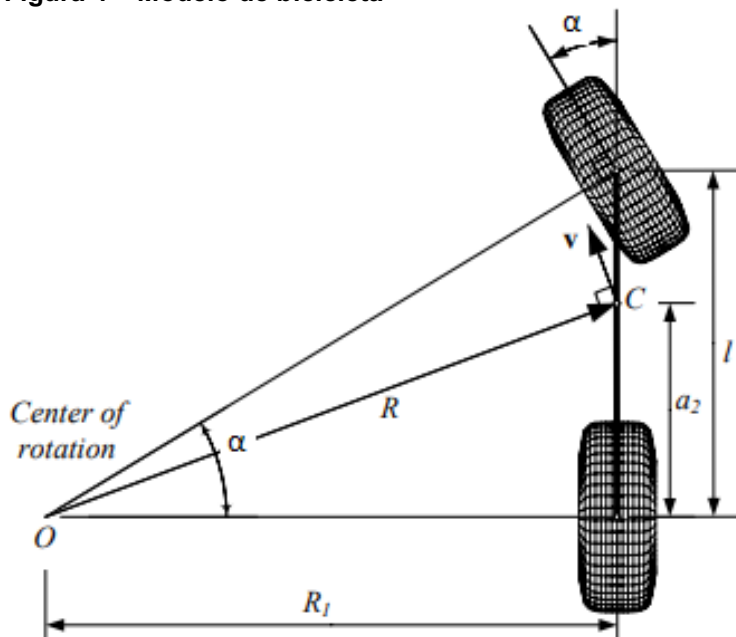
Figura 3 – Teorema de Ackermann



Fonte: Adaptado de Gillespie (1997).

Para simplificar ainda mais o sistema, Jazar (2014) propõe o modelo de bicicleta, nesse caso α_1 e α_2 são aproximados por um ângulo α médio, e as rodas traseiras aproximadas como um único conjunto no centro do eixo, Figura 4.

Figura 4 – Modelo de bicicleta



Fonte: Jazar (2014).

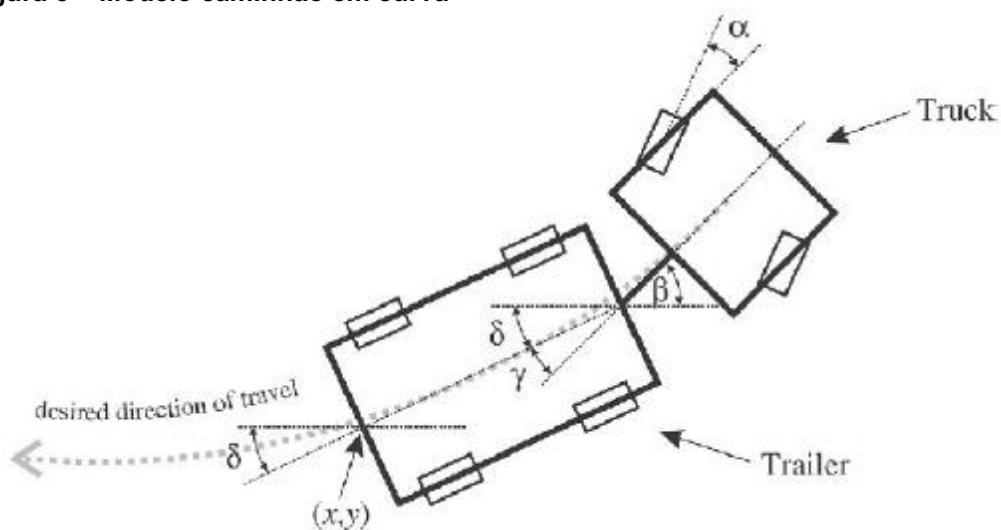
Utilizando desse modelo é possível calcular o R_1 raio da trajetória percorrida pelo eixo traseiro do veículo a partir do ângulo de esterçamento α e do entre-eixos do veículo l :

$$R_1 = \cot \alpha * l$$

1

Para posicionar o veículo nos eixos cartesianos Zimic e Mraz (2006) propuseram um modelo baseado nesse teorema, apresentado na Figura 5, mas que leva em consideração a presença de um implemento articulado.

Figura 5 – Modelo caminhão em curva



Fonte: Zimic e Mraz (2006).

As equações 2 à 6 definem dinamicamente o sistema:

$$\gamma(t) = \beta(t) - \delta(t) \quad 2$$

$$\beta(t + 1) = \beta(t) - \frac{v\Delta t}{l_1} \tan \alpha(t) \quad 3$$

$$\delta(t + 1) = \delta(t) - \frac{v\Delta t}{l_2} \sin \gamma(t) \quad 4$$

$$x(t + 1) = x(t) + v\Delta t \cos \gamma(t) \cos \delta(t) \quad 5$$

$$y(t + 1) = y(t) + v\Delta t \cos \gamma(t) \sin \delta(t) \quad 6$$

Onde γ é o ângulo entre o cavalo mecânico e a carreta, δ e β os ângulos entre o implemento e o cavalo mecânico e o eixo horizontal respectivamente, α o ângulo de esterçamento das rodas, v a velocidade, Δt variação de tempo, l_1 e l_2 o comprimento do trator e da carreta respectivamente, x e y as coordenadas do centro do último eixo de toda a combinação.

Outra situação cinemática importante para veículos com um ou mais implementos articulados é o chamado de efeito *jackknife*, isso ocorre quando, enquanto o veículo estiver se movimentando para trás, o ângulo γ só aumenta não importando o valor de α . A fim de evitar essa situação, é comum utilizar-se 90° como o limite para o ângulo γ (ZIMIC; MRAZ, 2006).

2.2 SENSORES E ATUADORES PARA APLICAÇÃO AUTOMOTIVA

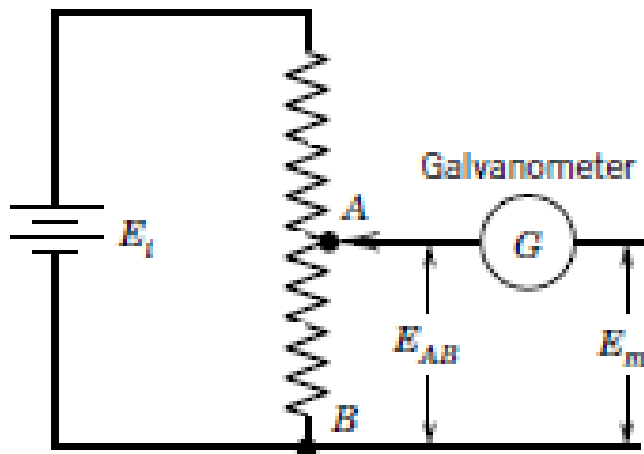
Os principais sensores e atuadores a serem utilizados para o problema em questão são:

- a) *Global Position System* (GPS): Sistema de posicionamento global é um sistema de navegação global que, para Christensson (2006), é utilizado para determinar a posição de um objeto na Terra. O sistema inclui 24 satélites, eles são separados igualmente de forma que em qualquer lugar do mundo 4 são vistos diretamente através de uma linha de visão direta.

Cada satélite emite uma mensagem que inclui, sua posição atual, órbita e tempo exato, o receptor de GPS combina a informação de pelo menos 3 satélites através de um processo chamado de triangulação, definindo assim a posição do objeto.

- b) Potenciômetro: Figliola e Beasley (2001) definem um potenciômetro simples como um dispositivo derivado de um de um circuito divisor de voltagem, conforme a Figura 6. Esse componente é utilizado para medição de variáveis angulares em diversos sistemas do veículo, como por exemplo nas direções e suspensões.

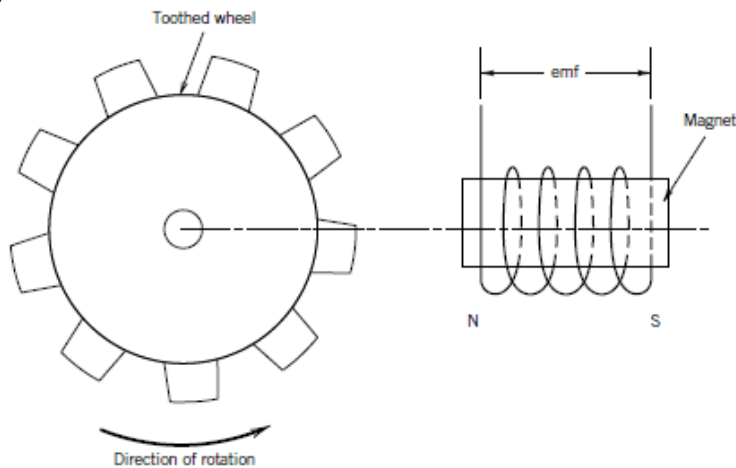
Figura 6 – Exemplo de potenciômetro



Fonte: Figliola e Beasley (2001).

- c) Sensor indutivo: Consiste na junção de um roda dentada, fabricada em material ferro-magnético e um captador magnético, que é feito através de um ímã e uma bobina, como indicado na Figura 7. Presente normalmente em sistemas onde é necessário descobrir a velocidade angular de um certo eixo ou elemento rotativo, como por exemplo as rodas do veículo.

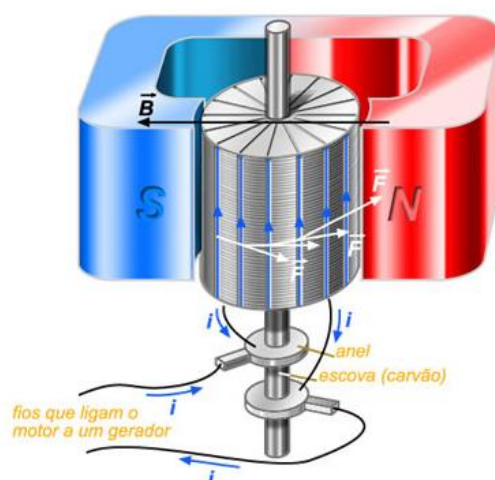
Figura 7 – Sensor indutivo



Fonte: Figliola e Beasley (2001).

- d) Motor elétrico: O funcionamento dos motores elétricos é baseado nos princípios do eletromagnetismo, no qual, condutores situados em um campo magnético atravessado por uma corrente elétrica, contínua ou não, sofre a ação de uma força mecânica, o torque, um exemplo de motor pode ser visto na Figura 8. Aplicado em inúmeros sistemas veiculares que necessitam de aplicação de uma força externa: motores de arranque, sistemas de direção entre outros.

Figura 8 – Motor elétrico



Fonte: Santos (2020).

2.3 SISTEMA DE CONTROLE

Um sistema de controle consiste em um conjunto de equipamentos utilizado para supervisionar e manter um processo em um determinado ponto de atuação, chamado *setpoint*. Para isso, envia sinais de correção para os atuadores do sistema (OGATA, 1998).

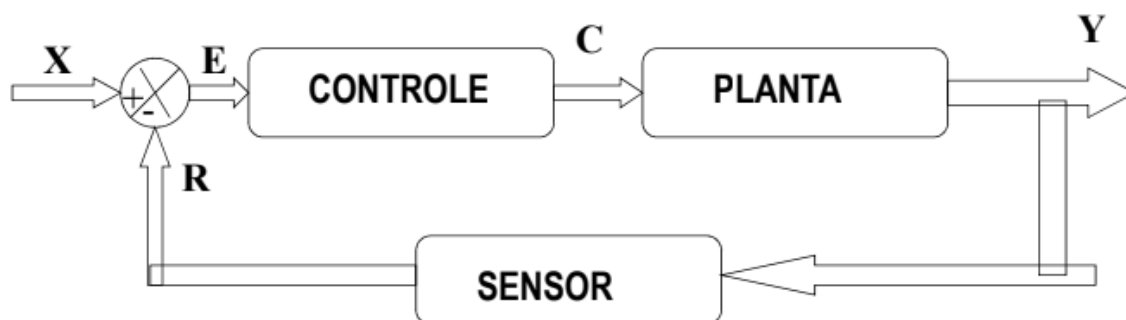
Existem dois tipos principais de sistemas de controle: a) Malha Aberta (MA) e b) Malha Fechada (MF).

Na MA a variável a ser controlada não é medida, tornando-o totalmente dependente de uma prévia calibração, usado normalmente quando uma planta é estável e não existe nenhum tipo de distúrbio atuante. Por outro lado, a MF utiliza do conceito de retroação, ou seja, existe uma relação entre sinal de saída e o *setpoint* (valor desejado).

Um exemplo de malha fechada pode ser visto na Figura 9. Nesse caso a variável controlada do sistema é medida através de um sensor físico e comparada

ao valor de referência, a partir da diferença entre esses dois valores surge o chamado erro. Assim, a partir do erro, o algoritmo de controle envia um sinal a planta, modificando a variável manipulada a fim de diminuir ou anular o desvio encontrado.

Figura 9 – Controle em malha fechada



Fonte: Autoria própria.

Ainda na Figura 9, “X” representa a variável de entrada/manipulada, “R” o Valor medido pelo sensor, “E” o erro, “C” o sinal de controle enviado, e “Y” a variável controlada.

Para cada um dos componentes desse sistema, alguns modelos e construções matemáticas podem ser utilizados, como por exemplo:

- Controle: ele pode ser feito através de uma lógica PID (Proporcional Integral e Derivativa), de um algoritmo *Fuzzy*, redes neurais, entre outros.
- Planta: Para simulações pode-se utilizar modelos por espaço de estados, estocásticos, determinísticos. Para situações reais a própria planta a ser controlada é utilizada.
- Sensores: Dependendo de qual a variável a ser medida o dispositivo adequado deve ser utilizado.

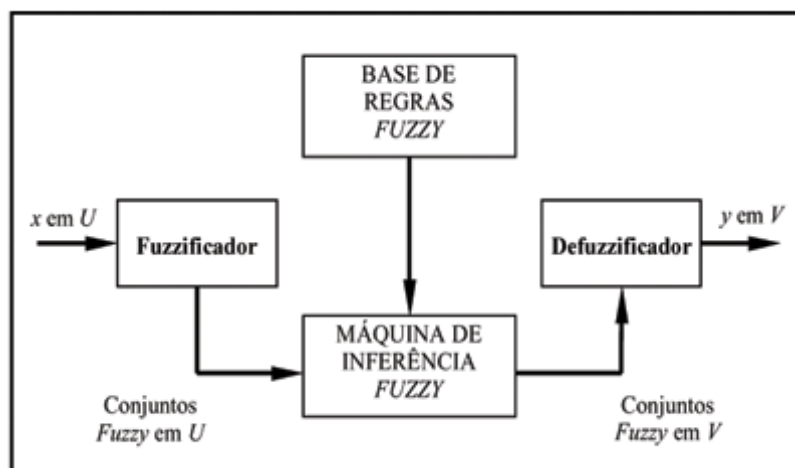
2.4 CONTROLADOR LÓGICO FUZZY

Segundo Zmic e Mraz (2006) a lógica *fuzzy* é o oposto da lógica binária. Na lógica *fuzzy* uma afirmação nunca é 100% verdadeira ou falsa, assim é possível processar dados e conhecimento originário de ambientes incertos, não-lineares. O

principal exemplo desse tipo de sistema é o próprio ser-humano. A estrutura básica de um sistema fuzzy é apresentada na Figura 10.

Ao utilizar a experiência humana nos termos das variáveis linguísticas, as regras *fuzzy*, é possível controlar as entradas de um sistema olhando apenas para sua saída, tornando desnecessário o conhecimento da dinâmica interna do mesmo.

Figura 10 – Modelo de controlador fuzzy



Fonte: Vieira *et al.* (2007).

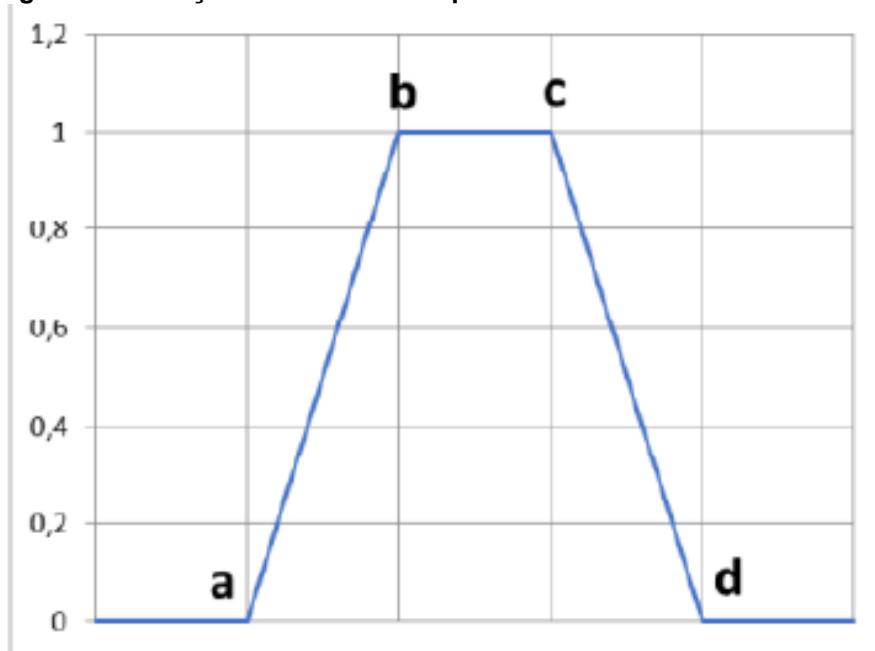
O primeiro passo para aplicação da lógica *fuzzy* é a definição das variáveis de entrada e de saída de um sistema. Como exemplo pode ser apresentada a definição da gorjeta em um restaurante (MATLAB, 2020b). Nesse caso, são definidas duas entradas, qualidade da comida e qualidade do atendimento para uma saída, valor da gorjeta. Após é feita a divisão das variáveis em conjuntos difusos ou fuzzy, dentro da lógica difusa essa é uma etapa de classificação das entradas e saídas de acordo com uma característica, no exemplo apresentado a seguinte metodologia pode ser utilizada:

- Qualidade da comida pode ser ruim, regular ou ótima.
- Qualidade do atendimento pode ser ruim, bom ou ótimo.
- A Gorjeta pode ser barata, média ou generosa.

Para cada uma dessas classificações ou conjuntos fuzzy é definida uma função de inferência, que realiza o mapeamento de um valor admitido para variável de entrada em um número fuzzy, que varia entre 0 e 1. Essas funções de inferência podem ser representadas de inúmeras formas, sigmoide, hiperbólica, tangente, exponencial, gaussiana, sendo mais comum a forma trapezoidal. A Figura 11 ilustra

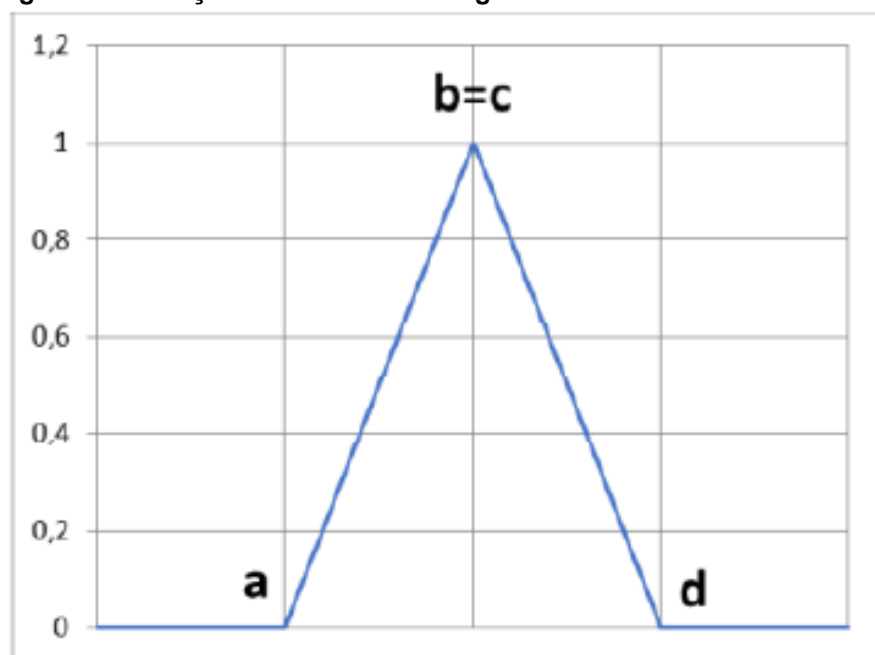
esta situação, sendo ela definida por 4 principais pontos: início e final da rampa de subida, pontos “a” e “b” e início e final da rampa de descida, “c” e “d” reespectivamente. Outro formato é o triangular apresentado na Figura 12, sendo um caso especial da trapezoidal onde os pontos “b” e “c” possuem o mesmo valor.

Figura 11 – Função de inferência trapezoidal



Fonte: Zonatto (2018).

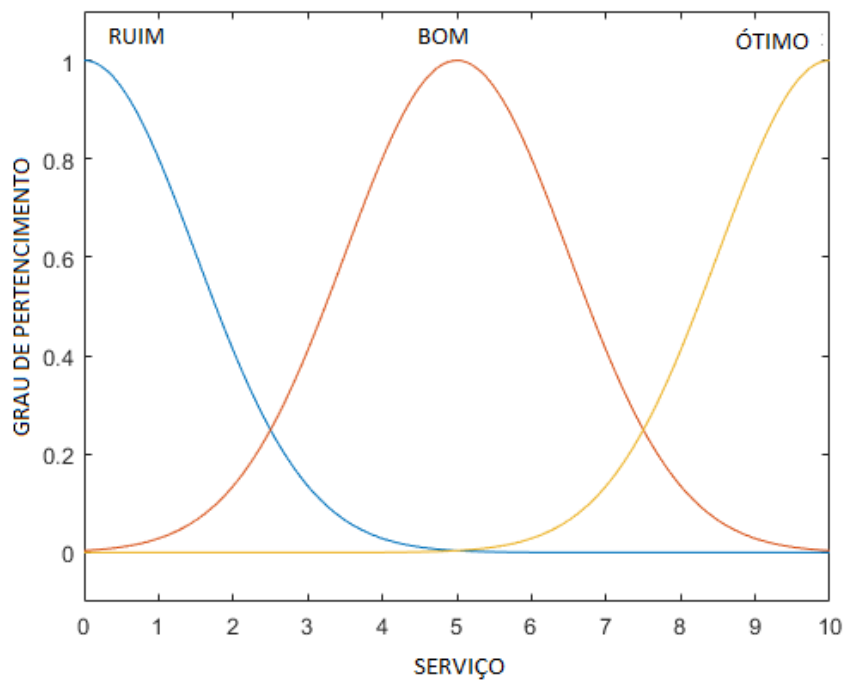
Figura 12 – Função de inferência triangular



Fonte: Zonatto (2018).

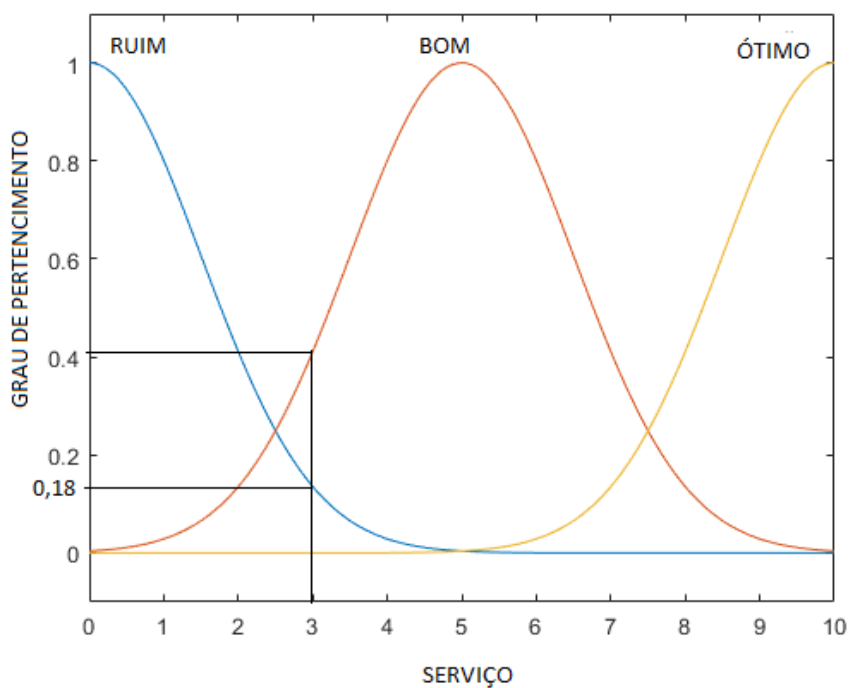
A Figura 13, mostra um exemplo de definição de funções de inferência, onde o cliente classificaria o atendimento do restaurante em uma nota de 0 a 10. O processo de extração dos números *fuzzy* apresentados no gráfico da Figura 14.

Figura 13 – Primeiro exemplo de fuzzyficação



Fonte: Adaptado de MatLab (2020a).

Figura 14 – Segundo exemplo de fuzzyficação



Fonte: Adaptado de MatLab (2020a).

Nesse caso, o serviço, classificado como 3, é considerado 0 ótimo, aproximadamente 0,18 ruim e 0,4 bom.

A base de regras fuzzy consiste em uma coleção de regras linguísticas do tipo “se condição, então Ação”. Se dentro da primeira porção das regras existir mais de uma condição, os operadores “e” e “ou” são aplicados, eles podem ser interpretados reespectivamente como mínimo, ou seja o menor valor fuzzy encontrado na fuzzyficação, ou máximo, onde o maior é utilizado (MATLAB, 2020c).

No exemplo da gorjeta, três regras podem ser criadas:

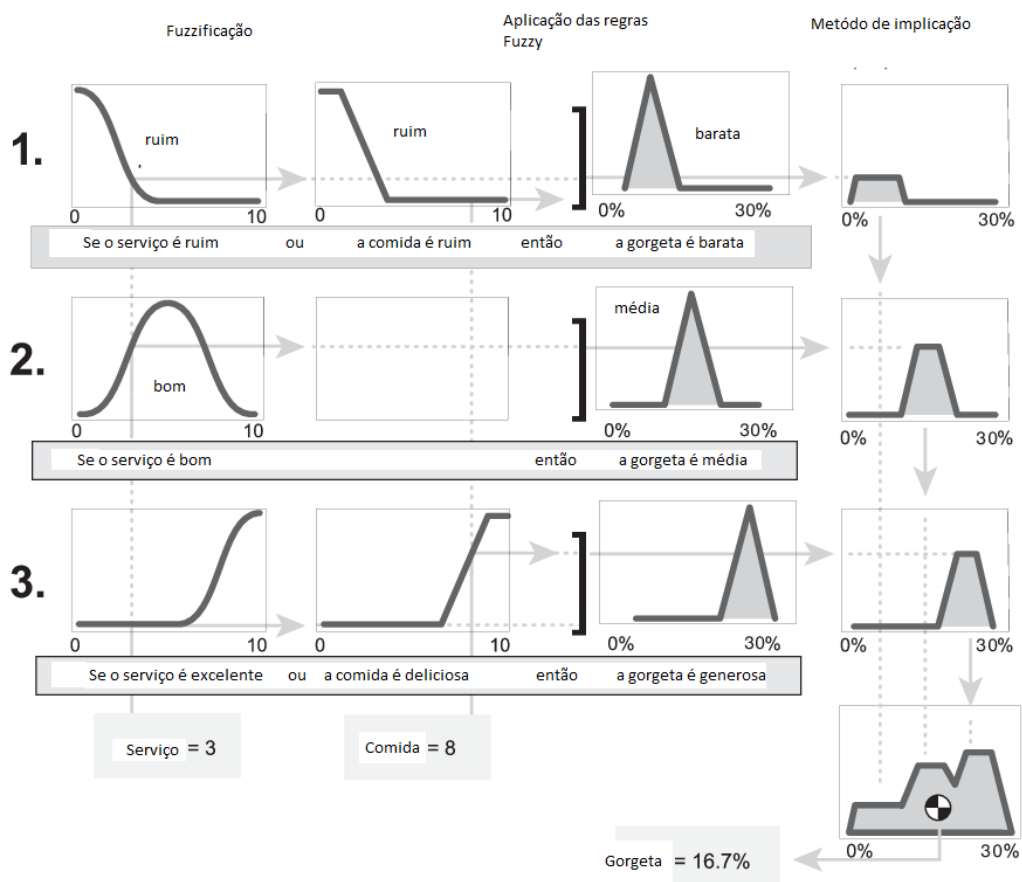
- Se o serviço é ruim ou a comida ruim a gorjeta é barata.
- Se o serviço é bom então a gorjeta é média.
- Se o serviço é ótimo ou a comida ótima a gorjeta é generosa.

Após a definição da regras o próximo passo é transformar os diversos valores fuzzyficados em um único valor real de saída. Para isso existem métodos diferentes, sendo os mais conhecidos e utilizados, o Mamdani e o Sugeno. Enquanto o primeiro utiliza de métodos de defuzzyficação o segundo utiliza a média ponderada (ZONATTO, 2018).

Os controladores Mamdani, exemplificado na Figura 15, foram introduzidos como método para criação de sistemas de controle através da sintetização de um conjunto de regras obtidas de operadores humanos experientes (MAMDANI; ASSILIAN, 1993). Por isso será o objeto de estudo deste trabalho.

A Figura 15 demonstra um controlador Mamdani completo. Nela é perceptível que após a fuzzyficação e aplicação das regras *fuzzy* o valor obtido é traduzido para função de inferência das regras de saída, esse processo é repetido para todas as regras existentes, nesse caso três. Então, todas as superfícies são combinadas e defuzzyficadas. Na defuzzyficação diversos métodos podem ser utilizados, entre eles: centroide, bissetriz, MOM (*Middle Of Maximum*), SOM (*Smallest Of Maximum*), LOM (*Largest Of Maximum*). O exemplo aqui apresentado utiliza o centroide, que consiste em calcular o centro da massa da área obtida após a combinação de todas as regras.

Figura 15 – Exemplo de controlador Mamdani



Fonte: Autoria própria.

2.4.1 Controladores Fuzzy Hierárquicos

Segundo Zimic e Mraz (2006), pode-se generalizar as regras de controladores Mamdani da seguinte forma:

$$\text{if}(X_1 \text{ is } A_1) \text{ and } (X_2 \text{ is } A_2) \dots (X_n \text{ is } A_n) \text{ then } (Y_1 \text{ is } B_1) \text{ and } (Y_2 \text{ is } B_2) \dots \text{ and } (Y_m \text{ is } B_m) \quad 7$$

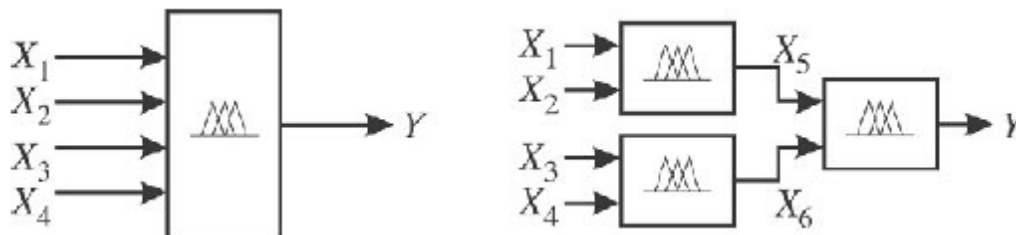
Onde os termos $X_i (i = 1, \dots, n)$ representam as variáveis de entrada, $Y_j (j = 1, \dots, m)$ as de saída, e os respectivos A_i e B_j os valores linguísticos (conjuntos Fuzzy), sendo assim, n e m são o número de entradas e saídas reespectivamente.

Focando na primeira parte da equação, conclui-se que a número de operações de inferência fuzzy, dependem de n e do número de valores linguísticos predefinidos para cada entrada $S(X_i) = |A_i| (i = 1, \dots, n)$. O número máximo de operações de inferência M pode ser estimado como:

$$M \leq \prod_{i=1}^n S(X_i)$$

Isso demonstra que o número de operações, ou seja, custo computacional, aumenta exponencialmente com o aumento de variáveis do sistema, desse forma um método para otimização foi proposto, a decomposição de um único conjunto *fuzzy* em um conjunto de dois ou mais de menor complexidade, como apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Decomposição de um fuzzy complex em um HFS



Fonte: Zimic e Mraz (2006).

No caso ilustrado novamente na Figura 16, se considerado o número de valores linguísticos como $i = 5$, o número de operações cai de $M \leq 5^4 = 625$ para $M \leq 2 \times 5^2 + 5^2 = 75$.

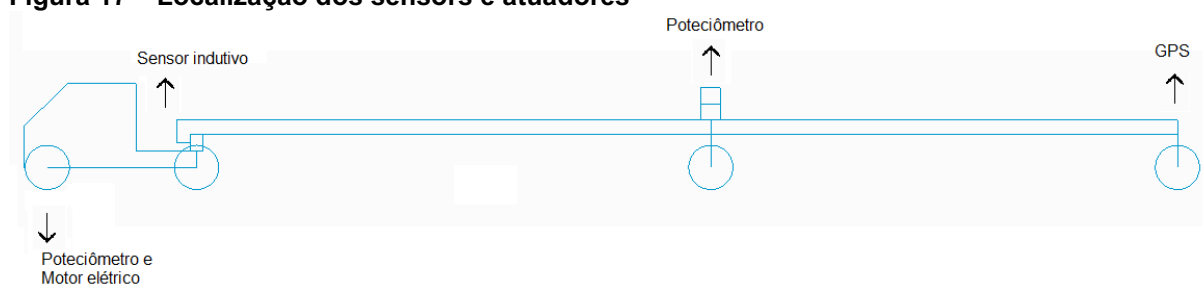
3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho. Primeiramente em 3.1, o modelo de instrumentação do veículo e do ambiente é explanado. Em seguida, na seção 3.2, é demonstrada a modelagem matemática do caminhão bitrem. Por último, o controlador *fuzzy* utilizado é apresentado.

3.1 MODELO DE INSTRUMENTAÇÃO DO VEÍCULO E DO AMBIENTE

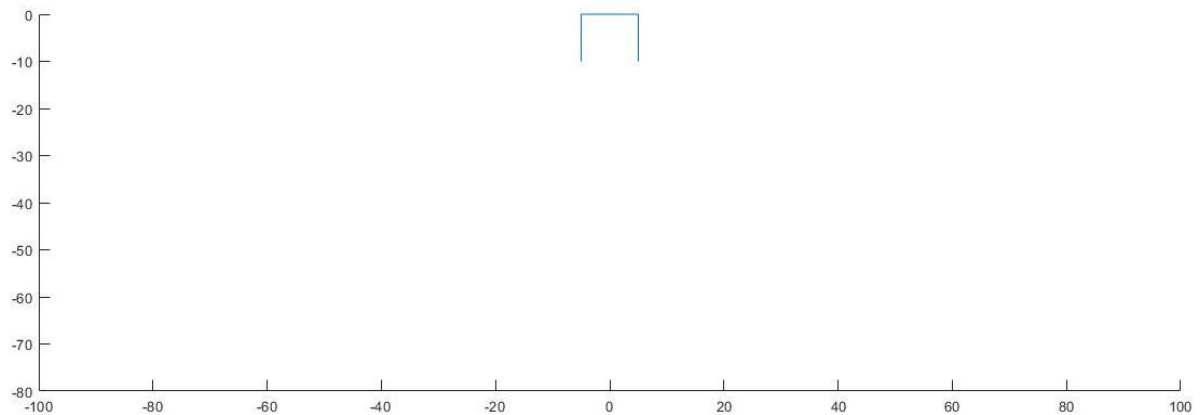
O sensoriamento proposto foi baseado no apresentado em Zimic e Mraz (2006). A Figura 17, ilustra um diagrama de como seriam instalados os sensores e atuadores no veículo.

Figura 17 – Localização dos sensors e atuadores



Fonte: Autoria própria.

A Figura 18 ilustra o diagrama de espaço de estacionamento, a origem do sistema de coordenadas coincide com o final da vaga de estacionamento, e o eixo y está alinhado com a direção de estacionamento, a vaga possui 5 metros de largura e 10 de comprimento. O GPS instalado próximo ao último eixo da combinação é utilizado para identificar a posição relativa entre a composição e o espaço de estacionamento.

Figura 18 – Diagrama do espaço de estacionamento

Fonte: Autoria própria.

A medição do ângulo relativo entre o primeiro e segundo implemento, é feita por meio da instalação de um potenciômetro na conexão das carretas, possibilitando identificar a direção de manobra.

O Ângulo relativo entre a vaga de estacionamento e a última carreta esse ângulo foi ajustado de forma que o valor 0 represente a carreta alinhada a vaga de estacionamento, para isso foi somada a constante $-\frac{\pi}{2}$.

A velocidade do veículo é medida utilizando um sensor indutivo simples no volante do motor.

Já o ângulo de esterçamento atual das rodas, variável manipulada do sistema, também é obtida por meio de um potenciômetro angular instalado na coluna de direção. O motor elétrico que é o atuador controlado é instalado juntamente com esse sensor.

3.2 MODELO DE BITREM

Utilizando como base o modelo apresentado na seção 2.1, e adicionando mais um grau de liberdade é possível propor um modelo cinemático de cavalo mecânico mais 2 implementos. Como demonstrado novamente na Figura 17, algumas simplificações foram feitas, o ponto de pivotamento dos implementos se encontra exatamente acima do centro do eixo do vagão anterior e possíveis balanços traseiros são descartados.

$$\gamma_1(t) = \beta(t) - \delta_1(t) \quad 9$$

$$\gamma_2(t) = \delta_1(t) - \delta_2(t) \quad 10$$

$$\beta(t + 1) = \beta(t) - \frac{v\Delta t}{l_1} \tan \alpha(t) \quad 11$$

$$\delta_1(t + 1) = \delta_1(t) - \frac{v\Delta t}{l_2} \text{sen } \gamma_1(t) \quad 12$$

$$\delta_2(t + 1) = \delta_2(t) - \frac{v\Delta t}{l_3} \text{sen } \gamma_2(t) \quad 13$$

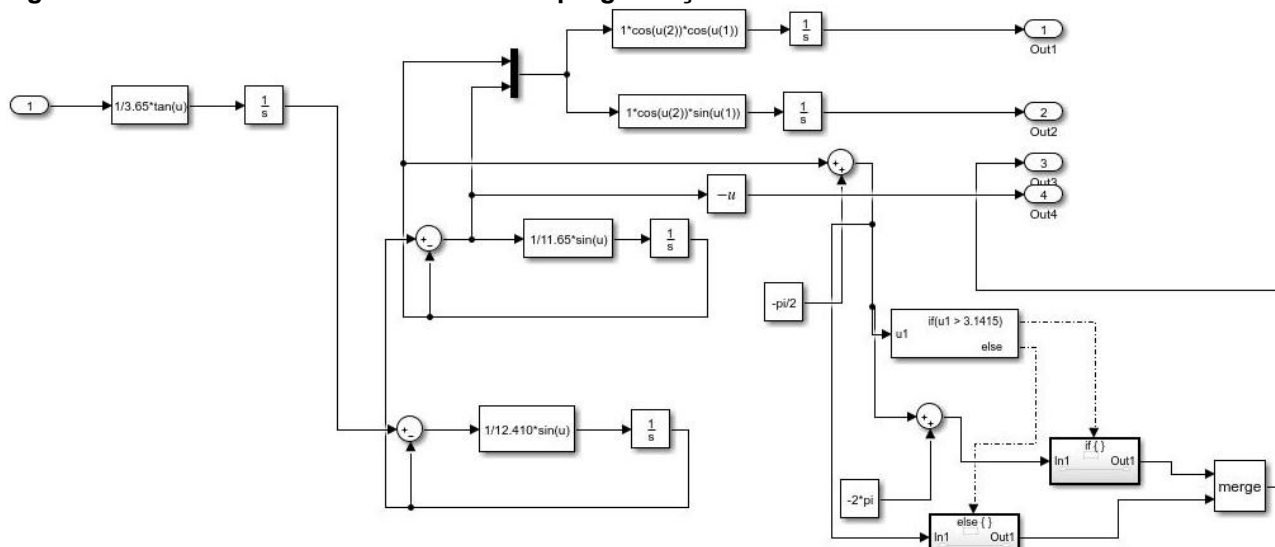
$$x(t + 1) = x(t) + v\Delta t \cos \gamma_2(t) \cos \delta_2(t) \quad 14$$

$$y(t + 1) = y(t) + v\Delta t \cos \gamma_2(t) \sin \delta_2(t) \quad 15$$

Nas equações 10 a 16, γ_1 e γ_2 são, respectivamente, o ângulo entre o cavalo mecânico e a primeira carreta e entre o primeiro e segundo implementos, δ_1, δ_2 e β são os ângulos entre o primeiro e segundo implemento e o caminhão e o eixo horizontal, respectivamente, α é o ângulo de esterçamento das rodas, v é a velocidade, Δt é variação de tempo, l_1, l_2 e l_3 correspondem ao comprimento do trator, do primeiro e segundo implemento respectivamente, x e y são as coordenadas do centro do último eixo de toda a combinação

O próximo passo foi a implementação do modelo através da programação em blocos utilizando o software MatLab e sua extensão Simulink, Figura 19, neste modelo as entradas e saídas do sistema foram ajustadas de acordo com o sensoriamento proposto. Para que todos os ângulos tivessem valores correspondentes foi necessário um ajuste de sinal da variável γ_2 . Outra modificação necessária foi a introdução de um compensador de ângulo, pois se por algum motivo o caminhão completasse um volta em relação ao sistema de coordenadas era necessário manter o ângulo δ_2 dentro do *range* $-\pi$ a π .

Figura 19 – Modelo de caminhão bitrem em programação de blocos

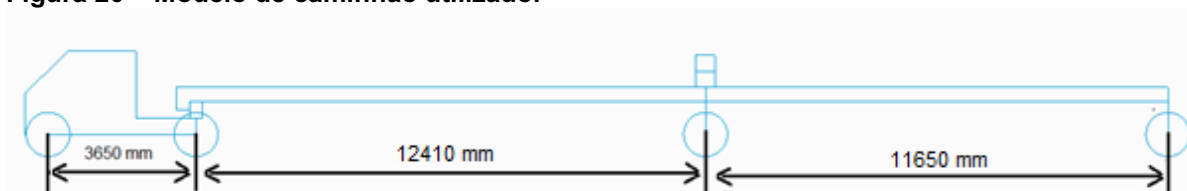


Fonte: Autoria própria.

Para etapa de validação do sistema foram definidas saídas extras da simulação. As posições no sistema cartesiano do centro do último eixo de todas as partes da combinação, e os ângulos entre as partes da composição, dessa forma é possível compará-los com modelos teóricos, para simplificação a velocidade foi mantida como constante durante todo projeto.

As dimensões usadas na simulação estão representadas na Figura 20, que foram baseadas em implementos e combinações reais.

Figura 20 – Modelo de caminhão utilizado.

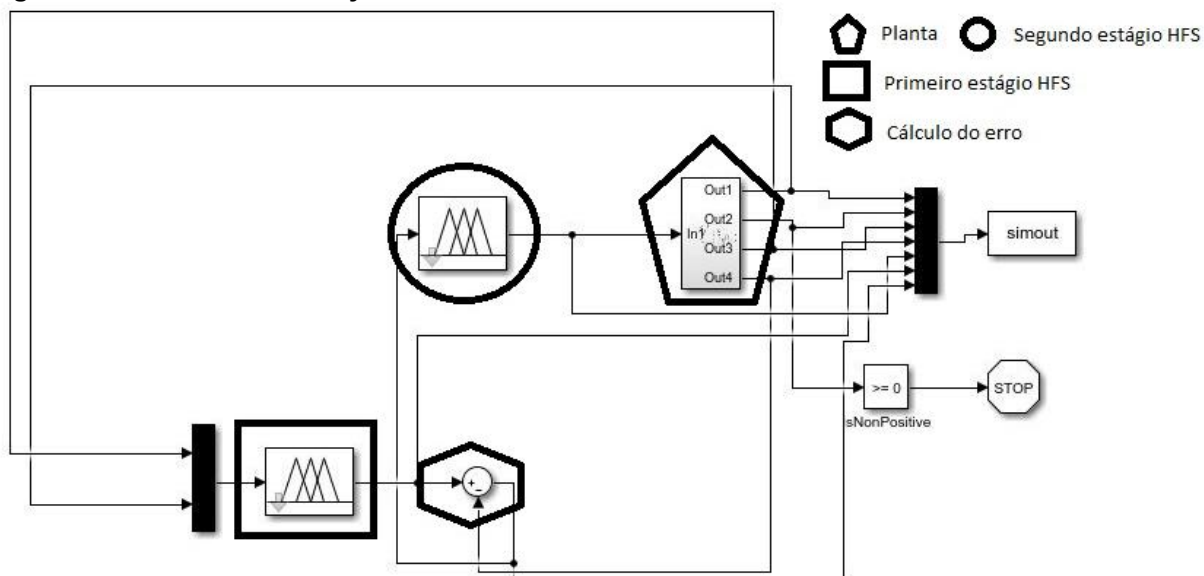


Fonte: Autoria própria.

3.3 DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR FUZZY

Utilizando como base o que foi desenvolvido no trabalho de Zimic e Mráz (2006), foi desenvolvido um controlador HFS, mas nesse caso com apenas dois estágios, como apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Controlador fuzzy desenvolvido



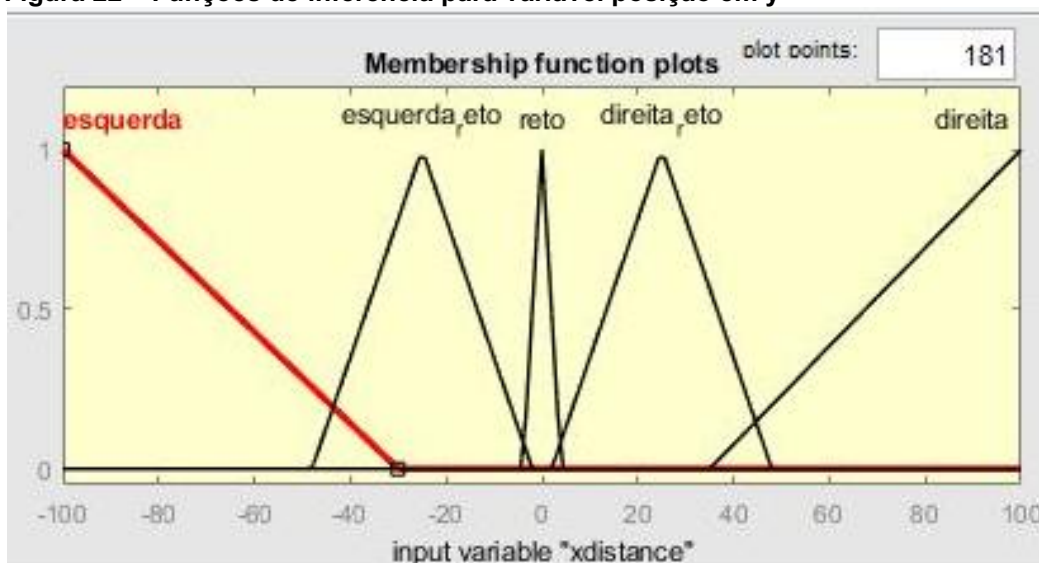
Fonte: Autoria própria.

Novamente na Figura 21 a planta a ser controlada, que é o modelo desenvolvido, está destacada com o pentágono, o primeiro estágio do HFS com o paralelepípedo e o segundo estágio com o círculo.

A primeira fase tem como entradas a posição horizontal do final da combinação x , e o ângulo entre a última carreta e o eixo horizontal δ_2 . Essas são as duas variáveis controladas do sistema. Elas foram divididas em 5 e 7 conjuntos *fuzzy* respectivamente.

A distância horizontal pode variar entre 100 metros a esquerda da vaga de estacionamento ou 100 metros a direita e foi dividida nos seguintes conjuntos: esquerda, esquerda-reto, reto, direita-reto e direita. As funções de inferência estão ilustradas na Figura 22, foram utilizadas funções do tipo triangular por serem mais simples e de fácil associação a experiência humana. A tabela com todas as suas características pode ser observada no Apêndice A.

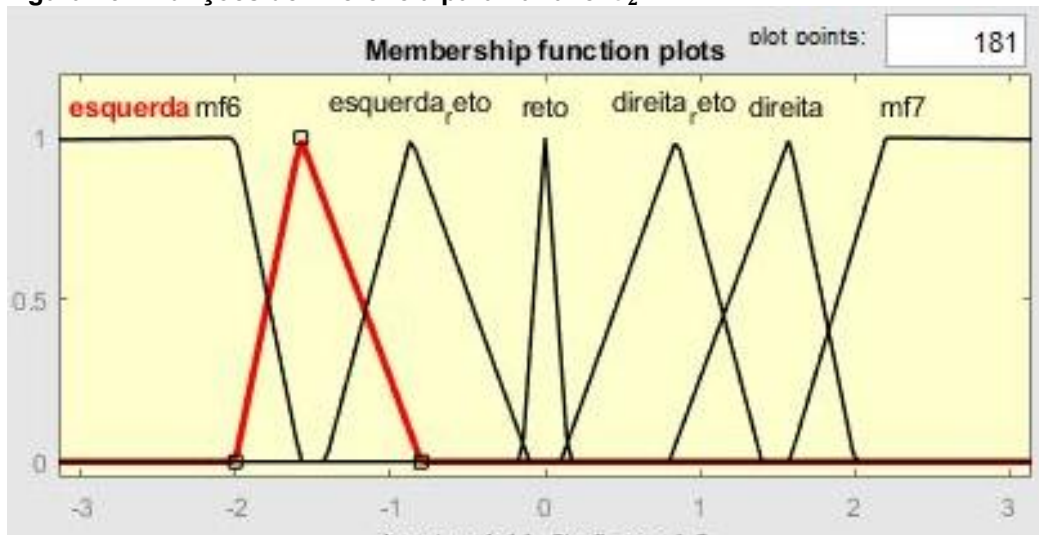
Figura 22 – Funções de inferência para variável posição em y



Fonte: Autoria própria.

O ângulo δ_2 pode variar entre $-\pi$ a π radianos e foi separado entre, esquerda-desviar (representa quando o veículo está se movendo para longe da vaga de estacionamento verticalmente), esquerda (perpendicular a vaga de estacionamento), esquerda-reto (se aproximando verticalmente da vaga de estacionamento), reto, direita e direita-reto, direita-desviar, o gráfico pode ser visto na Figura 23, neste caso foram utilizadas funções trapezoidais apenas para os conjuntos difusos, esquerda-desviar e direita-desviar, pois para que o veículo pare de se distanciar da vaga o mais rápido possível, era necessário que o valor *fuzzy* fosse sempre próximo do máximo. Para maiores informações refira-se ao apêndice A.

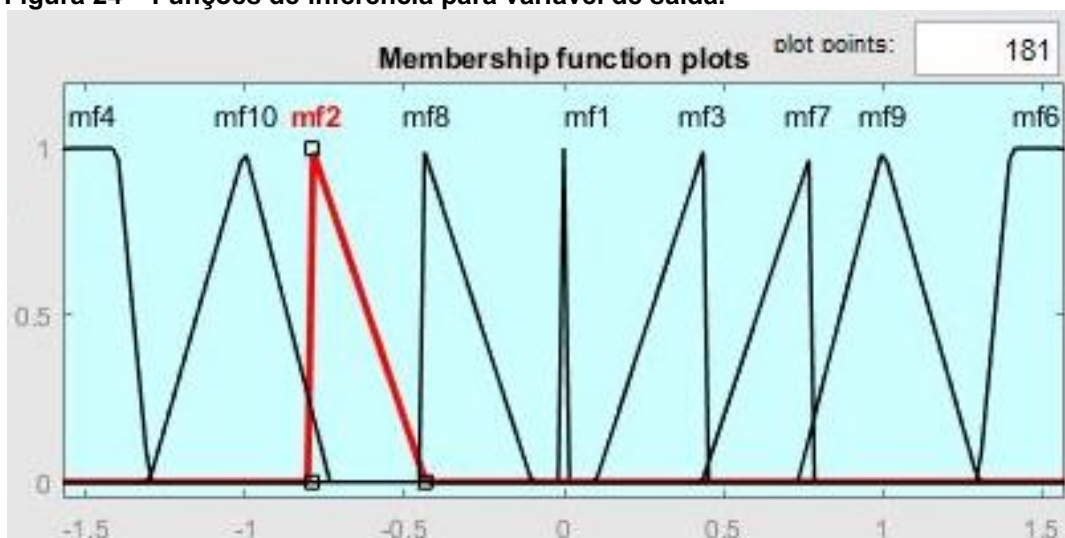
Figura 23 – Funções de inferência para variável δ_2



Fonte: Autoria própria.

A variável de saída foi definida como o ângulo γ_2 desejado para que a manobra seja concluída. Ele pode variar entre $-\frac{\pi}{2}$ e $\frac{\pi}{2}$ para que não aconteça o efeito de *jackknife*. Foram criados 9 conjuntos *fuzzy* diferentes para representar o ângulo desejado, gráfico exemplificado na Figura 24 e no apêndice A.

Figura 24 – Funções de inferência para variável de saída.



Fonte: Autoria própria.

O conjunto de regras *fuzzy* foi definido de forma que, quanto mais próximo perpendicularmente a combinação se encontra do local de estacionamento, mais paralela ela deve estar em relação a direção de entrada na vaga.

O Quadro 1 mostra todo o conjunto de regras, a primeira coluna indica em qual classificação se encontra o ângulo δ_2 , a segunda coluna a regra *fuzzy* utilizada, que nesse caso é sempre “e”, a terceira a classificação da distância entre a combinação e o espaço de estacionamento e por último a função de inferência da variável de saída escolhida. Para melhor exemplificação duas situações distintas são escolhidas.

Quadro 1 – Conjunto de regras fuzzy para a primeira etapa do HFS

Se ângulo da carreta é	E	Distância em x é	Então	Ângulo entre carretas é
Esquerda	E	Esquerda	Então	Mf1
Esquerda	E	Reto	Então	Mf4
Esquerda	E	Direita	Então	Mf4
Esquerda	E	Esquerda_reto	Então	Mf2
Esquerda	E	Direita_reto	Então	Mf4
Reto	E	Esquerda	Então	Mf6
Reto	E	Reto	Então	Mf1
Reto	E	Direita	Então	Mf4
Reto	E	Esquerda_reto	Então	Mf6
Reto	E	Direita_reto	Então	Mf4
Direita	E	Esquerda	Então	Mf6
Direita	E	Reto	Então	Mf6
Direita	E	Direita	Então	Mf1
Direita	E	Esquerda_reto	Então	Mf6
Direita	E	Direita_reto	Então	Mf7
Direita_Reto	E	Esquerda	Então	Mf6
Direita_Reto	E	Reto	Então	Mf6
Direita_Reto	E	Direita	Então	Mf10
Direita_Reto	E	Esquerda_reto	Então	Mf6
Direita_Reto	E	Direita_reto	Então	Mf3
Esquerda_Reto	E	Esquerda	Então	Mf9
Esquerda_Reto	E	Reto	Então	Mf4
Esquerda_Reto	E	Direita	Então	Mf4
Esquerda_Reto	E	Esquerda_reto	Então	Mf2
Esquerda_Reto	E	Direita_reto	Então	Mf4
Direita_desviar	E	Direita	Então	Mf9
Esquerda_desviar	E	Esquerda	Então	Mf10
Esquerda_desviar	E	Esquerda_reto	Então	Mf4
Esquerda_desviar	E	Direita	Então	Mf6
Esquerda_desviar	E	Direita_reto	Então	Mf9
Esquerda_desviar	E	Reto	Então	Mf4
Direita_desviar	E	Direita_reto	Então	Mf6
Direita_desviar	E	Esquerda	Então	Mf4
Direita_desviar	E	Esquerda_reto	Então	Mf4
Direita_desviar	E	Reto	Então	Mf6

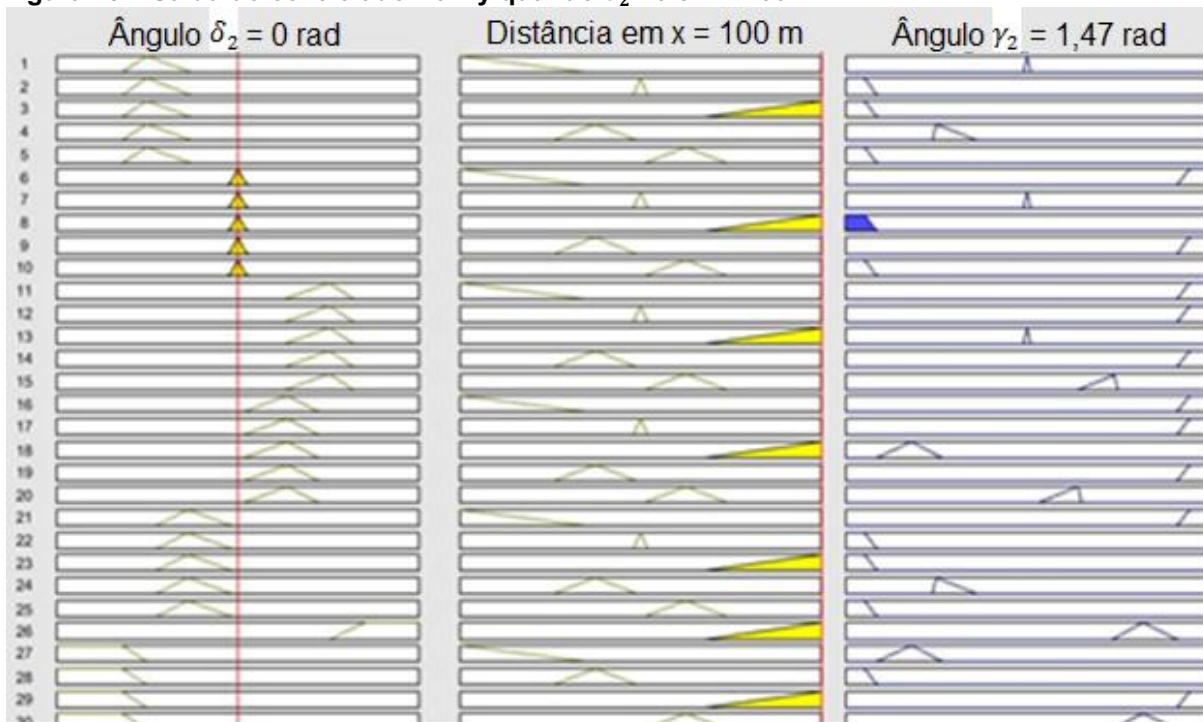
Fonte: Autoria própria.

Considerando que o veículo se encontra paralelo a vaga de estacionamento proposta, mas está a 100 metros de distância horizontalmente, segundo as regras, ele deveria estar se aproximando perpendicularmente a vaga.

A Figura 25 ilustra o comportamento do controlador nesta situação, nela cada regra *fuzzy* é representada por uma linha, na primeira e segunda coluna de gráficos, respectivamente, se encontram as funções de inferência para o ângulo δ_2 e para a distância x , a última coluna representa as funções de inferência para a variável de saída. Nesse caso apenas a regra 8 é ativada, dessa forma o ângulo γ_2 é definido como 1,47 radianos, seu valor máximo. A Figura 26 mostra o impacto como seria a trajetória do veículo nessa situação, é possível notar que a primeira ação do veículo

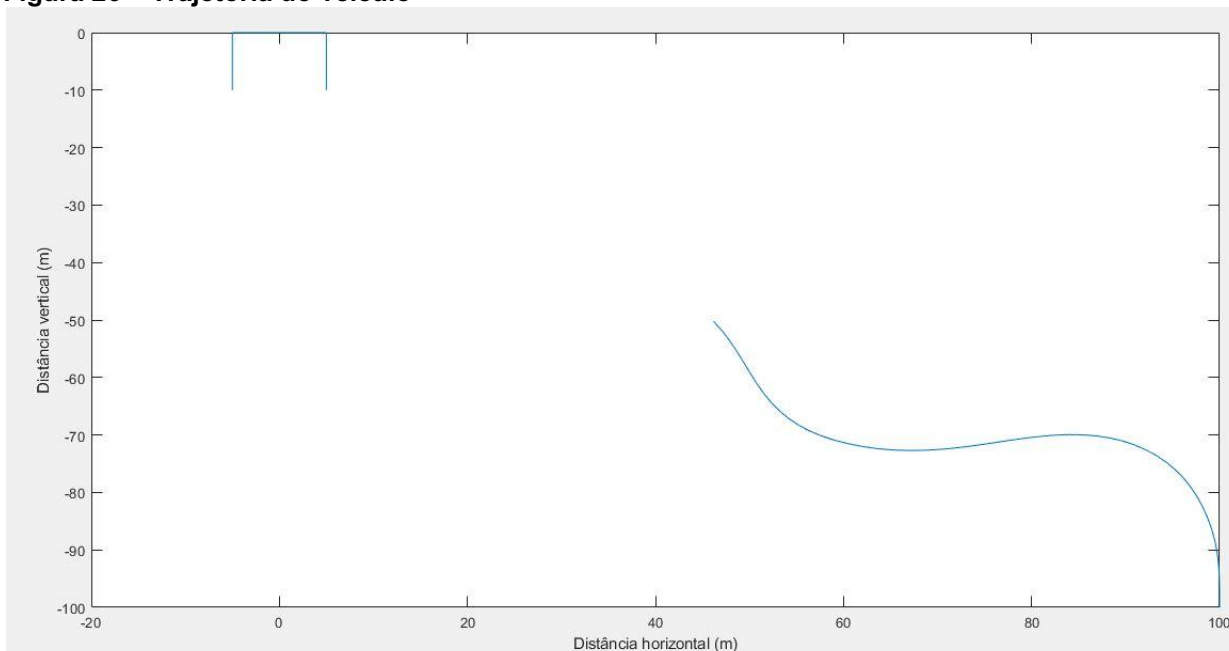
é virar o máximo para a direita de forma a se aproximar perpendicularmente da vaga de estacionamento.

Figura 25 – Saída do controlador fuzzy quando $\delta_2 = 0$ e $x = 100$



Fonte: Autoria própria.

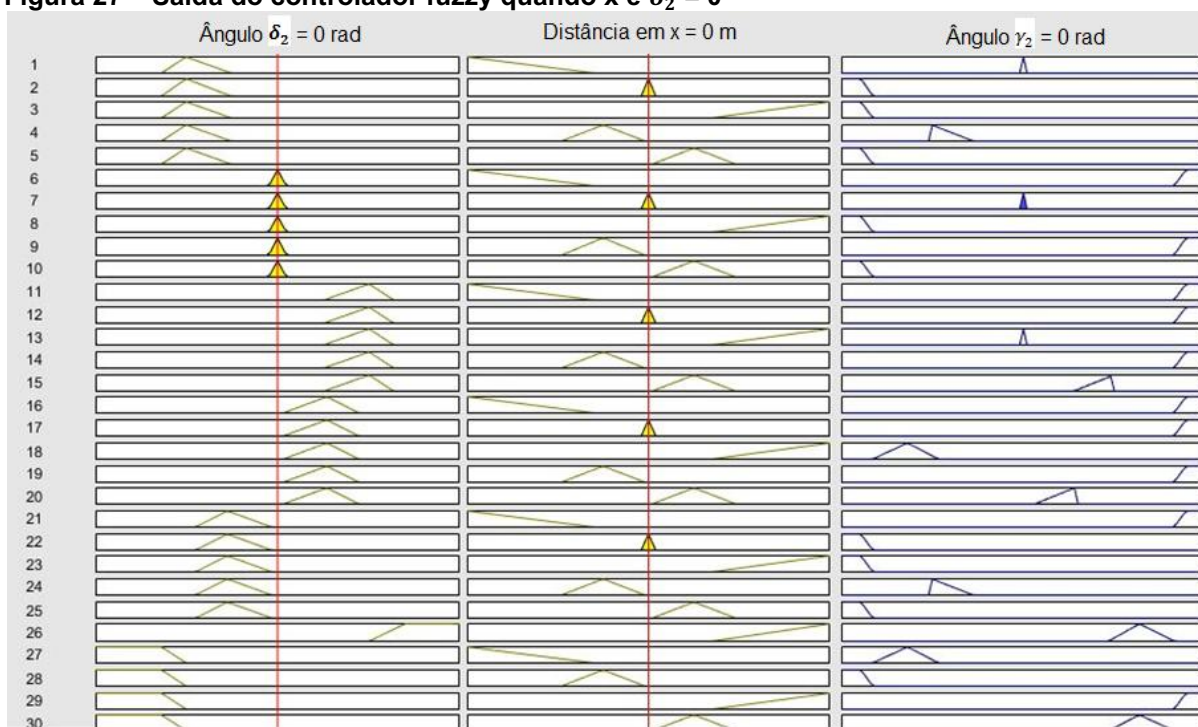
Figura 26 – Trajetória do veículo



Fonte: Autoria própria.

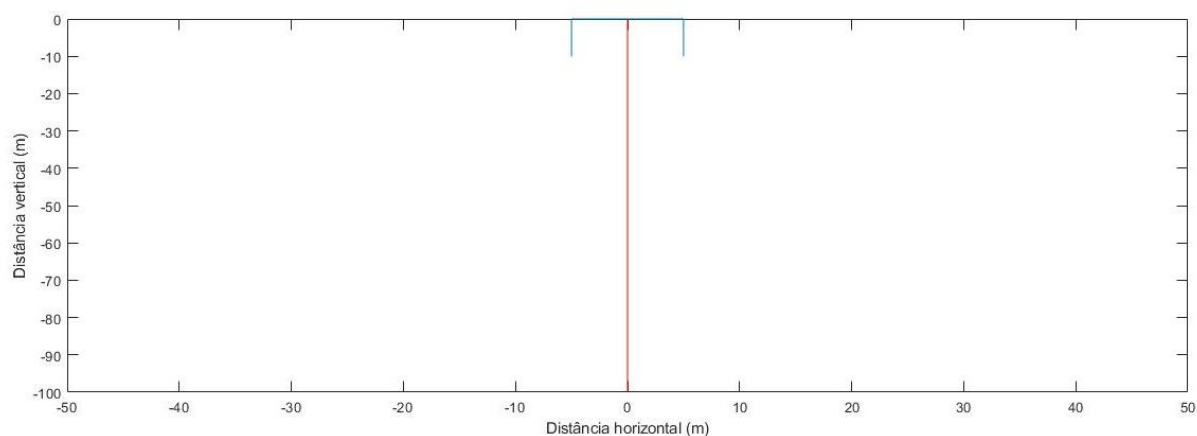
Outra situação seria quando a combinação se encontra paralela a direção de estacionamento, mas está alinhada com a vaga de estacionamento. A Figura 27 representa o mesmo diagrama apresentado ainda na Figura 25 para a situação onde $\delta_2 = 0$ e $x = 0$, nesse caso apenas a regra 7 é ativada e o ângulo γ_2 desejado é 0. A Figura 28 ilustra qual seria a trajetória do veículo, neste caso como ele já se encontra alinhado com a trajetória desejada o controlador nunca atua e a combinação segue um caminho reto até o final da manobra.

Figura 27 – Saída do controlador fuzzy quando x e $\delta_2 = 0$



Fonte: Autoria própria.

Figura 28 – Trajetória desejada

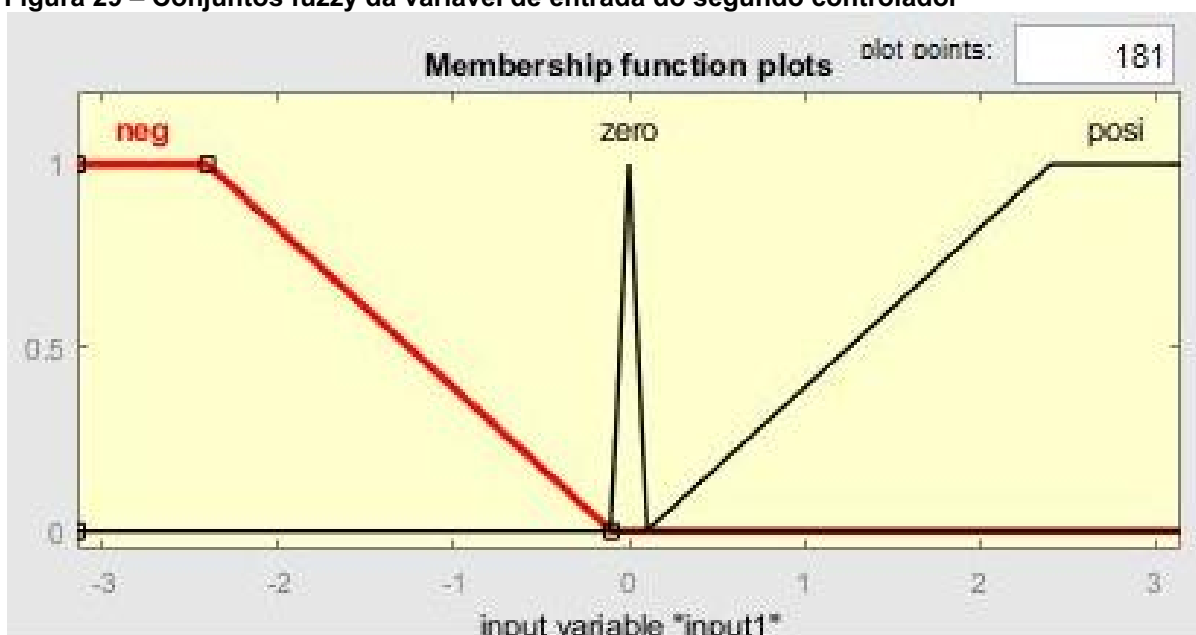


Fonte: Autoria própria.

Além disso, sempre que a combinação estiver se movimentando para o lado contrário da vaga de estacionamento, o ângulo é definido como máximo para que a trajetória desejada seja retomada.

O segundo estágio, que possui apenas duas variáveis, tem como entrada a diferença entre o ângulo das carretas obtido no primeiro conjunto *fuzzy* e o valor atual medido através do potenciômetro que é o erro obtido. Para isso, a variável foi dividida em 3 conjuntos *fuzzy*, como mostrado na Figura 29, são eles: “neg”, “zero” ou “posi”.

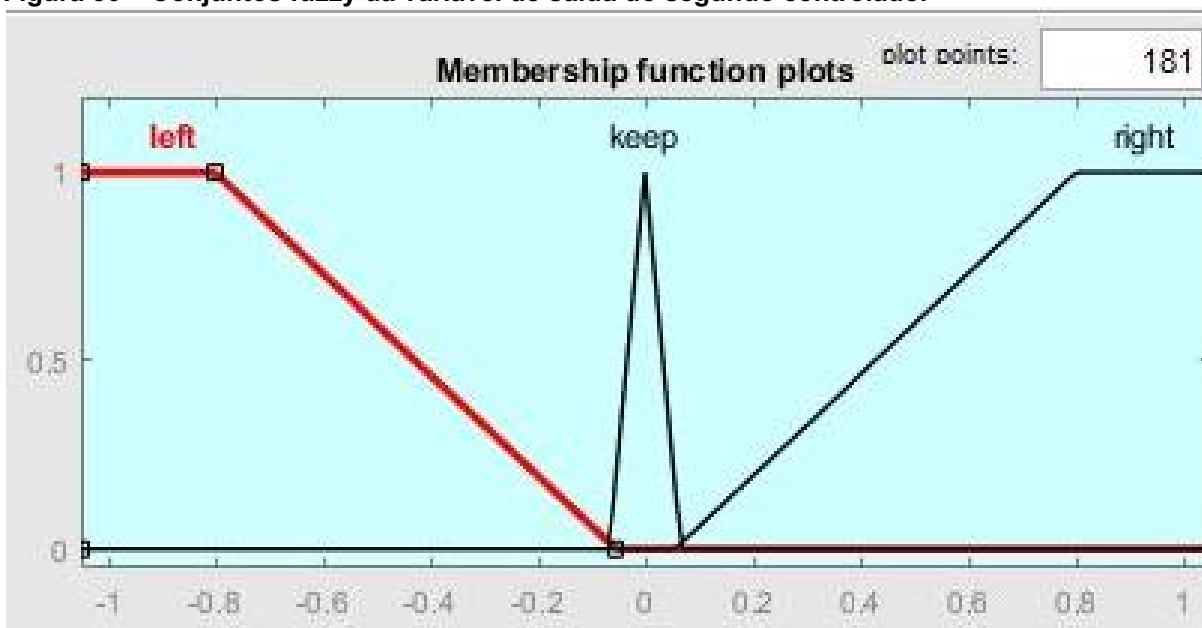
Figura 29 – Conjuntos fuzzy da variável de entrada do segundo controlador



Fonte: Autoria própria.

A saída é o ângulo desejado das rodas dianteiras, também dividida em 3 diferentes estágios, direita, centro e esquerda, em alusão a qual lado o caminhão estaria se deslocando (Figura 30). Essa variável tem como valores mínimo e máximo, -45° e 45° respectivamente, pois os ângulos de esterçamento máximo para veículos pesados ficam entre 40° a 50° .

Figura 30 – Conjuntos fuzzy da variável de saída do segundo controlador



Fonte: Autoria própria.

A base de regras *fuzzy* para este caso foi definida de acordo com o Quadro 2, onde a primeira coluna corresponde a classificação de variável de entrada a última a classificação do ângulo de saída.

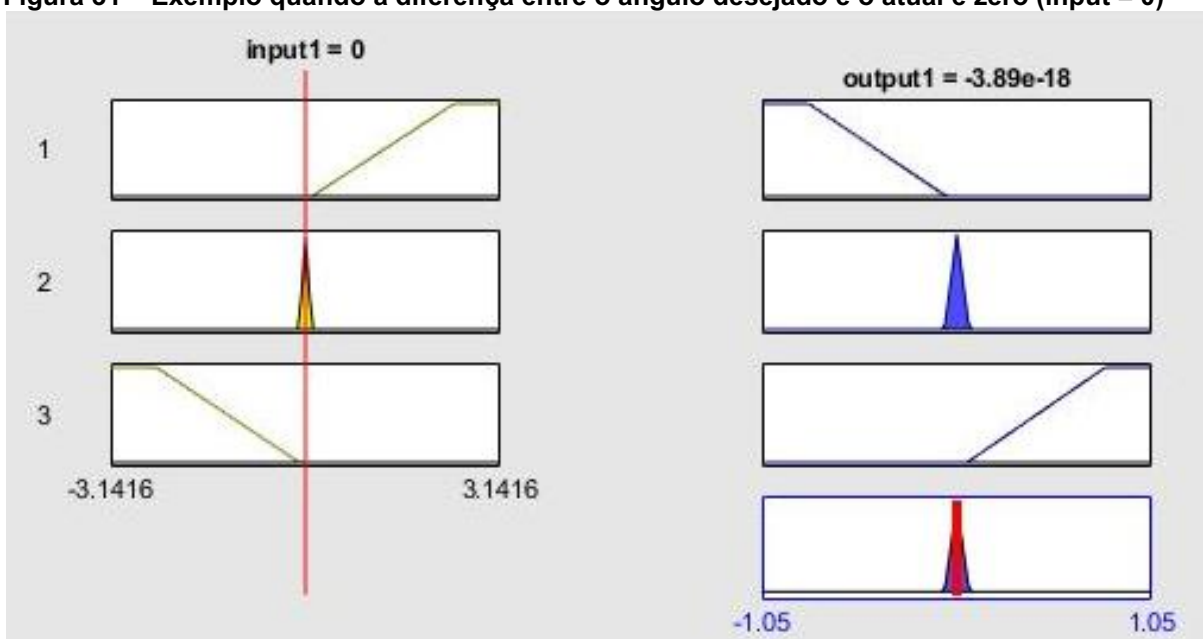
Quadro 2 – Conjunto de regras fuzzy para a segunda etapa do HFS

Se a diferença de ângulos é	Então	Ângulo de esterçamento é
Negativo	Então	Direita
Zero	Então	Manter
Positivo	Então	Esquerda

Fonte: Autoria própria.

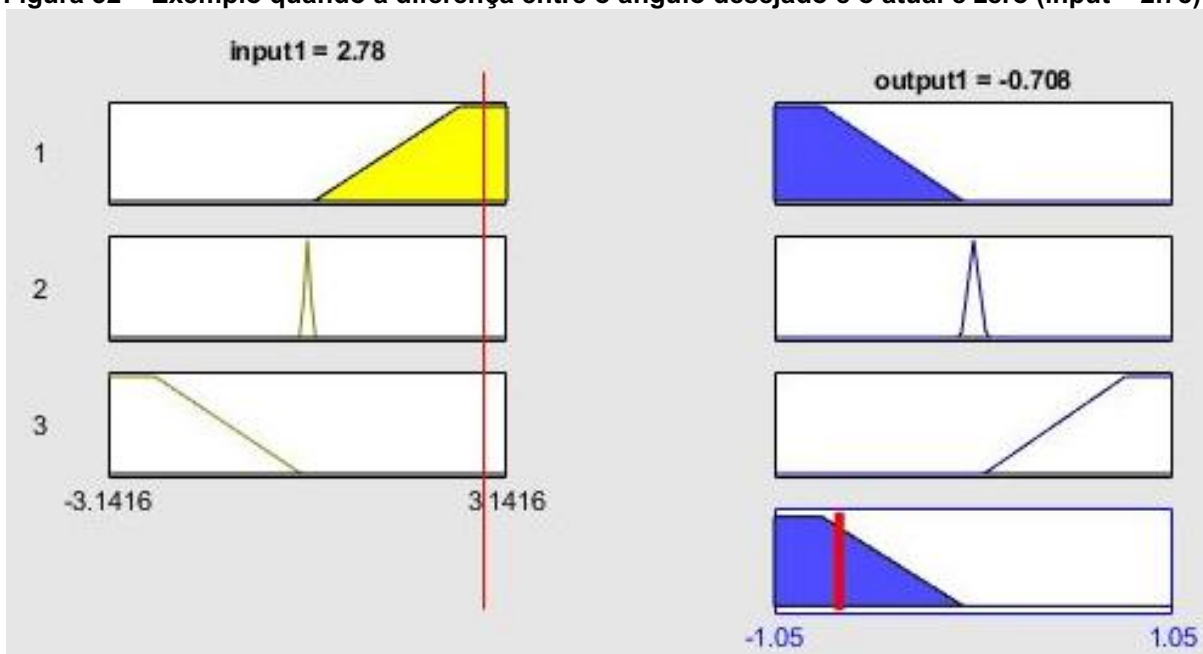
Novamente, duas situações distintas são utilizadas para melhor entendimento. A Figura 31 ilustra a atuação do segundo estágio do controlador *fuzzy* para a situação onde o erro de entrada é 0, cada linha novamente na Figura 31 representa uma regra *fuzzy* distinta, a primeira e segunda coluna, respectivamente, as funções de inferência das variáveis de entrada e saída. Nesse caso apenas a segunda regra é ativada e a saída do controlador é 0, pois a combinação já está se deslocando na trajetória desejada. Figura 32 utiliza-se do mesmo diagrama da Figura 31, mas para outra situação, onde a entrada é 2,78, nesse caso o ângulo de saída é máximo, pois o veículo se distanciou muito do caminho desejado.

Figura 31 – Exemplo quando a diferença entre o ângulo desejado e o atual é zero (input = 0)



Fonte: Autoria própria.

Figura 32 – Exemplo quando a diferença entre o ângulo desejado e o atual é zero (input = 2.78)



Fonte: Autoria própria.

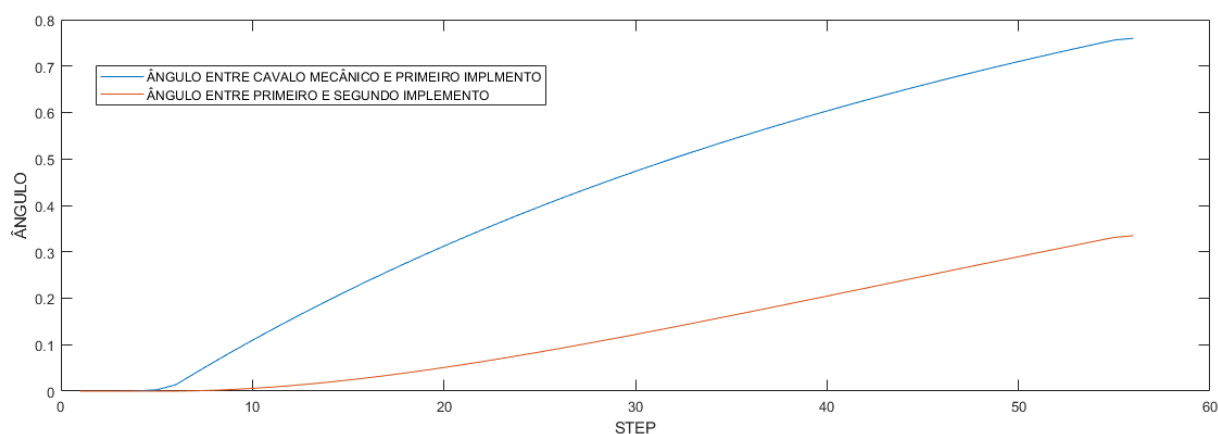
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos após a implementação do controlador HFS para a manobra de *docking* de veículos longos. Primeiramente é feita uma avaliação do modelo de caminhão bitrem proposto, comparando o resultado obtido através de simulação com outros modelos matemáticos. A próxima etapa é avaliar o comportamento do controlador para 5 manobras diferentes.

4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO DE CAMINHÃO

A situação escolhida para validar o modelo de simulação, leva em consideração que, se o ângulo de esterçamento é constante, o cavalo mecânico deve realizar uma trajetória circular e o seu raio de curvatura pode ser calculado de acordo com a Equação 1. Enquanto, o ângulo entre as combinações γ_1 e γ_2 irão aumentar até atingirem a estabilização em um ângulo de regime permanente, como pode ser visto na Figura 33. Após esse período também devem realizar uma trajetória circular com raio calculado a partir da Equação 1, utilizando no lugar de α os ângulos γ_1 e γ_2 .

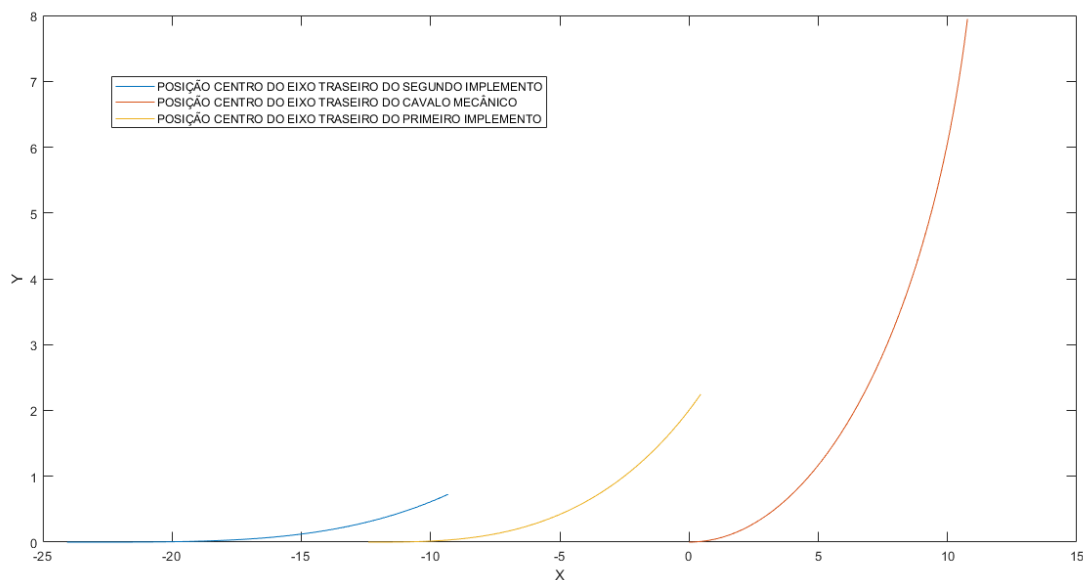
Figura 33 – Evolução dos ângulos entre carretas



Fonte: Autoria própria.

Foi realizada uma simulação com ângulo esterçamento de 40,1 graus (Figura 34), como pode ser visto todas as partes da combinação percorrem uma trajetória circular e o raio de curvatura obtido é no máximo 5% diferente do calculado empiricamente, para todos os casos estudados.

Figura 34 – Raio de curva dos implementos



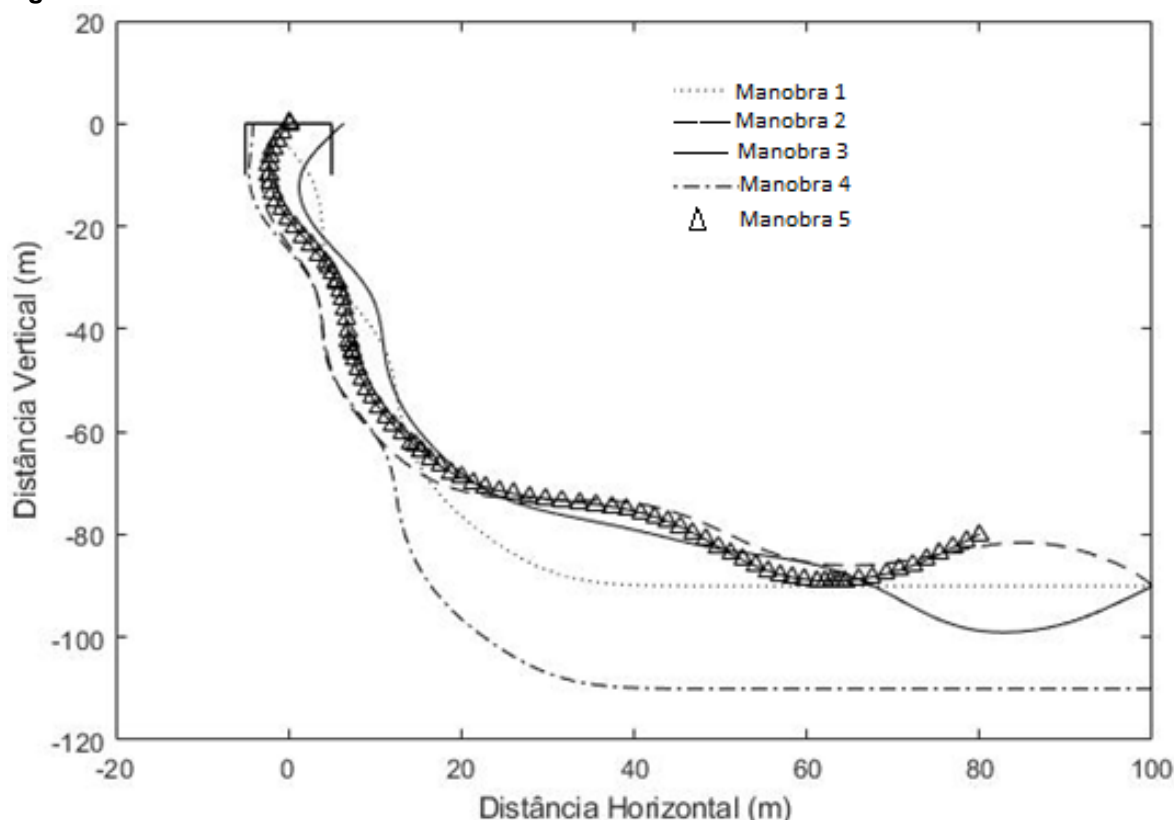
Fonte: Autoria própria.

4.2 MANOBRA DE ESTACIONAMENTO

Cinco posições iniciais de manobra foram definidas, como representado na Figura 35. Cada uma dessas situações representa uma condição inicial totalmente diferente:

- Manobra 1: a combinação estava perpendicularmente localizada a vaga de estacionamento, a 100 metros de distância horizontal e 90 metros vertical.
- Manobra 2: a angulação inicial era de 30° em relação a vertical, e a localização e mesma da primeira condição.
- Manobra 3: havia um ângulo de 130° em relação a vaga de estacionamento, 100 metros de distância horizontal e 90 de distância vertical.
- Manobra 4: praticamente igual a manobra 1, a única diferença foi a posição vertical, que foi alterada de 90 para 110 metros.
- Manobra 5: similar a manobra 3, distinguindo-se apenas pela posição inicial da combinação, -80 metros no eixo y e 80 metros no eixo x.

Figura 35 – Resultados obtidos



Fonte: Autoria própria.

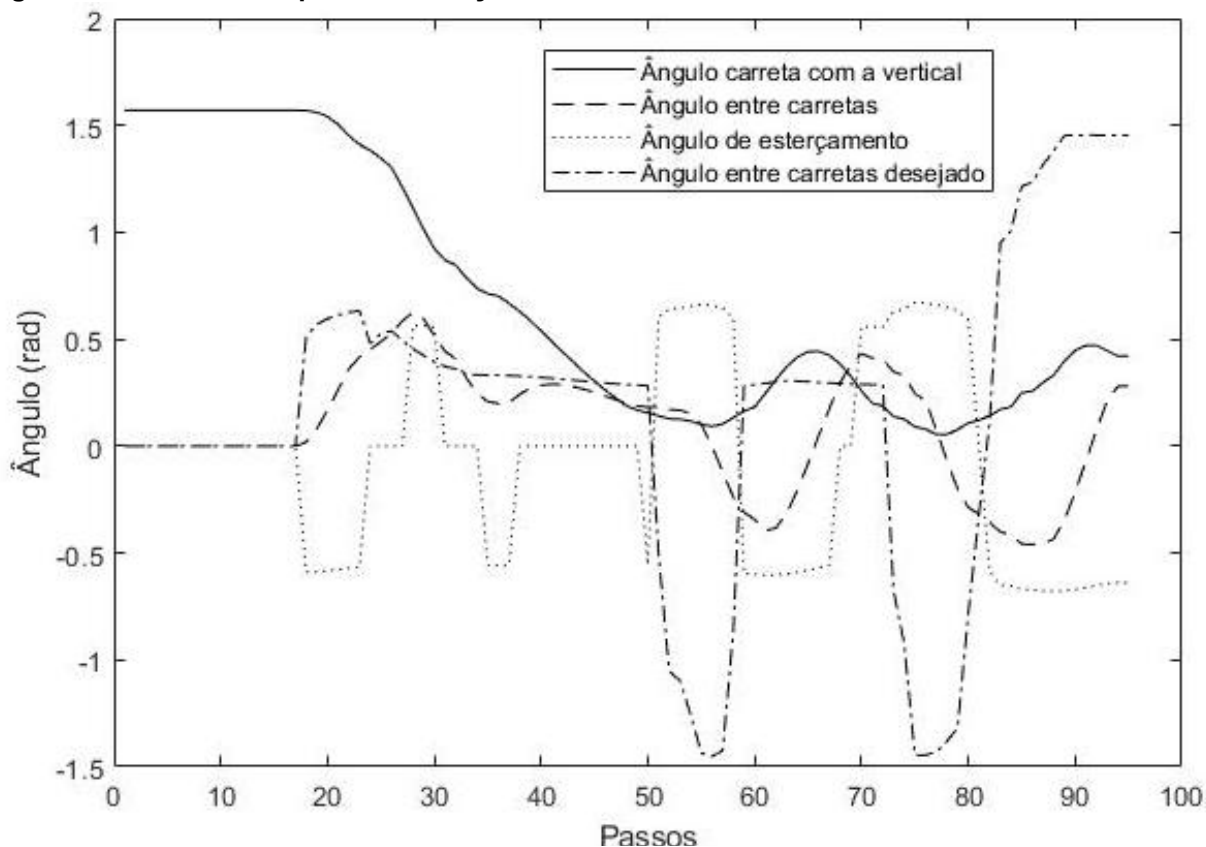
Novamente a Figura 35 apresenta as trajetórias da combinação para cada manobra. Analisando o gráfico obtido percebe-se que, em todos os casos, o veículo se comporta como esperado, ou seja, enquanto está localizado dentro do espaço que foi denominado de “direita”, ele deve se aproximar perpendicularmente a vaga. Nas manobras 2, 3 e 5, onde a posição inicial não era essa, a trajetória é ajustada. Nas manobras 1 e 4 essa condição já é atendida, então permanece a trajetória inicial. Quando a combinação entra no espaço denominado como “direita_reto” iniciava-se a manobra de estacionamento, dependendo do ângulo entre a combinação e o eixo vertical e a distância, a trajetória é regulada de forma a concluir a manobra corretamente.

Apesar disso, todas as condições apresentaram algum erro no final de sua trajetória, seja um erro de localização, onde a posição final não era exatamente a origem dos eixos cartesianos, ou angular, que significa que o veículo não estava totalmente paralelo ao eixo vertical ao final da manobra. Dessa forma, foram necessárias análises mais profundas dos dados obtidos.

4.2.1 Manobras 1 e 4

A Figura 36 mostra o comportamento das variáveis: ângulo da carreta com a vertical, ângulo entre as carretas, ângulo de esterçamento das rodas e o ângulo entre carretas desejado pelos passos da simulação, para a primeira condição inicial.

Figura 36 – Variáveis da primeira situação



Fonte: Autoria própria.

No início do gráfico é possível perceber que não há ação do controlador, pois a combinação já se encontrava na trajetória desejada naquele instante. Chegando a determinado tempo de simulação ocorre o primeiro comando para que o veículo inicie a curva. Nesse instante o ângulo desejado entre carretas salta quase que instantaneamente para o seu valor máximo, da mesma forma o esterçamento chega ao seu valor mínimo, já o ângulo real entre as carretas demorou muito mais tempo para acompanhar essa mudança. Houve um atraso de 8 passos de simulação até que a variável medida chegasse ao valor de pico desejado, e quando isso ocorreu a saída do controlador já não era a mesma.

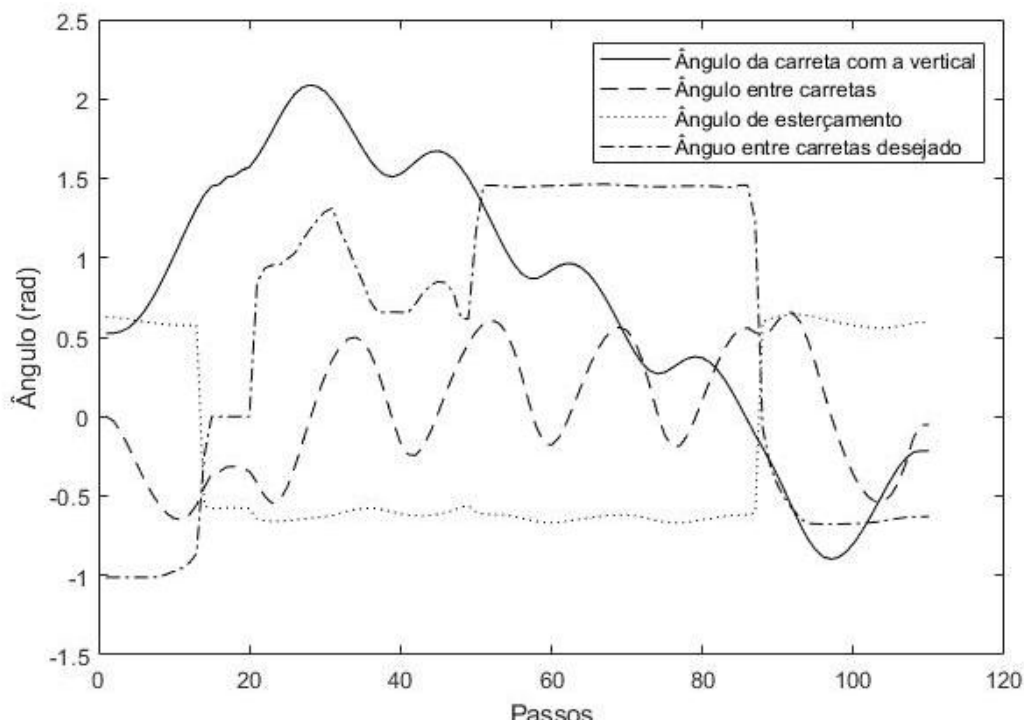
Conclui-se que, em praticamente nenhum momento a saída do controlador é igual ao valor medido fisicamente, o sistema sempre apresenta um erro. Isso acontece devido a inúmeros fatores, estão entre eles:

- O comprimento da combinação. Quanto maior o comprimento de um veículo maior deve ser o ângulo de esterçamento para que ele realize uma curva, fato esse comprovado através da equação 1.
- O esterçamento das rodas. Esse ângulo normalmente encontra-se entre a faixa de 40 a 50 graus em veículos pesados, o que limita uma mudança brusca de trajetória.
- Quantidade de vagões na combinação. A variável controlada nesse caso atua diretamente na inclinação do cavalo mecânico. É preciso que esse movimento seja transmitido por outras duas juntas de revolução até que influencie a inclinação da última combinação.
- Limitações físicas das conexões. Para que não aconteça o chamado efeito de “*jacking*”, a angulação entre as combinações é limitada a 90°, impedindo mudanças mais bruscas de trajetória.
- Dinâmica do sistema. Durante a manobra o motorista da combinação está sempre “corrigindo” o volante, ou seja, mudando o “*set point*” do sistema. A manobra 1 possui um erro angular de 0,42 rad e horizontal de 2,25 metros, já a manobra 4 0,002 rad e -4,11 metros respectivamente.

4.2.2 Manobra 2

O comportamento dos ângulos da carreta com a vertical, ângulo entre carretas, ângulo esterçamento e ângulo entre carretas desejado para a segunda situação é evidenciado na Figura 37.

Figura 37 – Variáveis da manobra 2

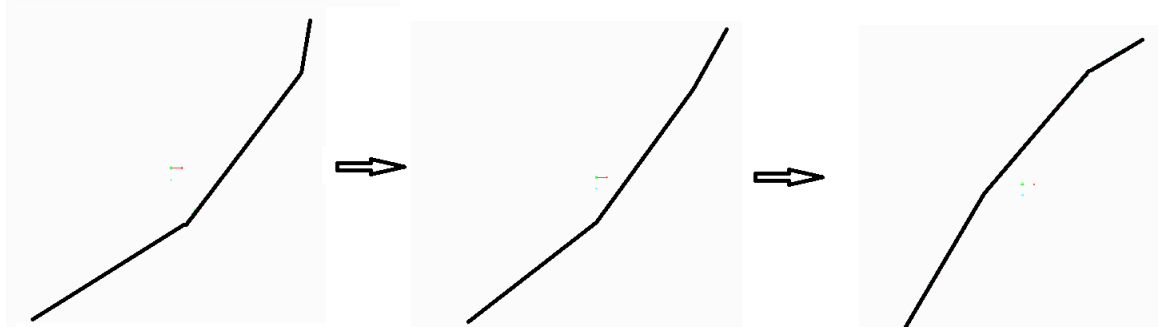


Fonte: Autoria própria.

Diferentemente da condição anterior, o controlador atua modificando a trajetória do veículo desde o início, buscando deixar a combinação perpendicular a direção de estacionamento. É possível perceber o mesmo atraso de resposta entre o ângulo γ_2 desejado e o real. Ao avaliar apenas os 20 primeiros passos da análise percebe-se que o ângulo real nunca atinge o valor máximo desejado no primeiro passo devido a brusca mudança de *set point* que acontece entre o décimo quinto e o vigésimo passo.

É possível concluir que quanto mais súbita e maior a magnitude da modificação do ponto de ajuste maior será o tempo para que o ângulo entre carretas se ajuste. A principal explicação para esse fenômeno é que, por exemplo, se o ângulo entre composições se encontra positivo para que se torne negativo, por mais que o ângulo de esterçamento seja modificado rapidamente, é preciso que todo o conjunto se redirecione, o que é um processo lento e gradativo. A Figura 38 mostra um exemplo de passo a passo para mudança de trajetória do veículo, nesse caso, cada linha representa um vagão da combinação.

Figura 38 – Processo para mudança de direção da combinação



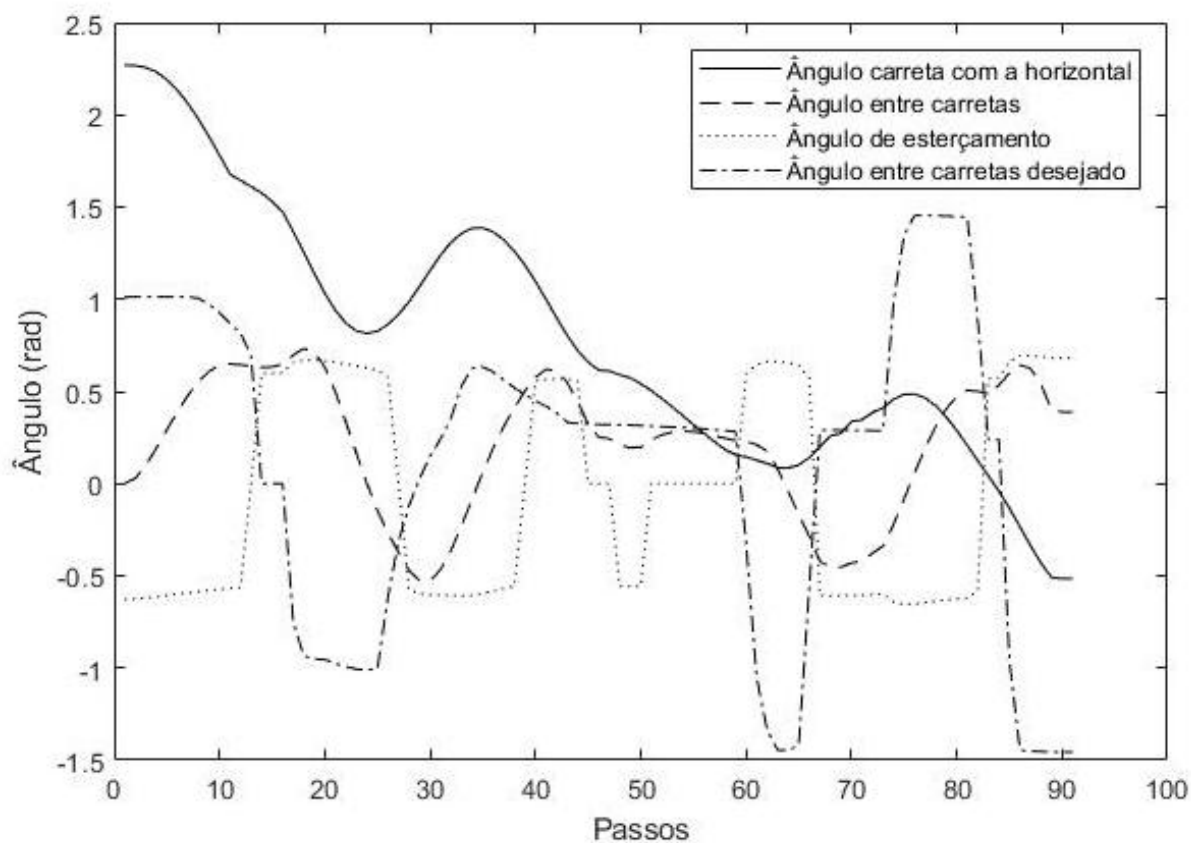
Fonte: Autoria própria.

Nesse caso, os erros de posição e angular foram respectivamente, 1,282 metros e -0,5 rad.

4.2.3 Manobras 3 e 5

A Figura 39, mostra o comportamento das variáveis da terceira situação pelos passos da simulação.

Figura 39 – Variáveis do caso 3



Fonte: Autoria própria.

Todas as características já estudadas nos casos anteriores podem ser também percebidas nesse gráfico, mas uma outra observação pode ser feita, quanto o maior número de ajustes feitos pelo controlador, maior será o atraso de resposta da variável medida, isso acontece pois a cada nova modificação o erro da etapa anterior é de certa forma carregado, isso pode ser visto se comparados os trechos de 0 a 20 passos onde o *delay* é de cerca de 10 passos, enquanto entre 20 e 30 passos esse atraso pode chegar a 15 passos.

Ao comparar-se os resultados dessas duas condições iniciais é possível perceber a dependência que o controlador tem da posição inicial do veículo, pois, por mais que eles estivessem com a mesma angulação em relação ao eixo vertical, os erros passaram de 6,36 metros e -0,56 rad, para manobra 3, para 0,184 metros e 0,51 rad na manobra 5.

5 CONCLUSÃO

A automação, seja ela parcial ou total, se encontra entre as principais tendências de desenvolvimento tecnológico atualmente na indústria automotiva, e o investimento nessa área tende a crescer ainda mais nos próximos anos.

Pensando nisso, esse trabalho buscou aplicar os conceitos da lógica *fuzzy* na automação de manobras complexas, visando o desenvolvimento de um veículo nível 3 de automação segundo a SAE.

Os objetivos específicos aqui propostos foram cobertos, total ou parcialmente, da seguinte forma:

- Utilizando como referências trabalhos anteriores um modelo cinemático de uma combinação com três vagões foi explanado.
- Foi proposto um sistema de sensores e atuadores que, utilizando apenas tecnologias já conhecidas e aplicadas no mercado automotivo, conseguiria fornecer dados suficientes para a manobra proposta, desde que o ambiente fosse conhecido e isolado, ou seja sem obstáculos não previstos.
- O controlador foi feito baseando-se na lógica *fuzzy* o que possibilita utilizar a experiência humana na criação de controladores digitais, ou seja, é de fácil aplicação em problemas não lineares.
- Foi possível realizar a manobra de *docking* utilizando-se do sistema proposto, mas não foi possível eliminar erros de posicionamento ou angulação ao final da trajetória, o que em uma aplicação real poderia acarretar em colisões.

É possível que, em trabalhos futuros, a lógica *fuzzy* aqui proposta possa ser utilizada em conjunto com técnicas de aprendizado de máquina e inteligência artificial. Para que durante a manobra o controlador se adapte as condições encontradas, possibilitando a eliminação dos erros identificados.

REFERÊNCIAS

CHRISTENSSON, Per. **GPS definition**. TechTerms. Sharpened Productions, 2006. Disponível em: <<https://techterms.com/definition/gps>>. Acesso em: 19 jan. 2020.

FIGLIOLA, Richard S.; BEASLEY, Donald E. **Theory and design for mechanical measurements**. 3. ed. Measurement Science and Technology, v. 12, n. 10. Digital Designs, 2001.

GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. Publicado por: Society of Automotive Engineers, Inc. Warrendale, 1997.

JAZAR, REZA N. **Vehicle dynamics: Theory and application**. 2. ed. New York: Springer Science, 2014.

MAMDANI, Ebrahim H.; ASSILIAN, Sedrak. **An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller**. In: Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems. Morgan Kaufmann, 1993. p. 283-289. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781483214504500328>>. Acesso em: 22 jan. 2020.

MATLAB. **Build fuzzy systems at the command line**. Documentação do MATLAB. Copyright© 1994-2020 The MathWorks, Inc. 2020a. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/fuzzy/working-from-the-command-line.html>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

MATLAB. **Building systems with fuzzy logic toolbox software**. Documentação do MATLAB. Copyright© 1994-2020 The MathWorks, Inc. 2020b. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/fuzzy/building-systems-with-fuzzy-logic-toolbox-software.html#FP6300>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

MATLAB. **What is Fuzzy Logic**. Documentação do MATLAB. Copyright© 1994-2020 The MathWorks, Inc. 2020c. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/fuzzy/what-is-fuzzy-logic.html>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

MODI, Shashank; SPULBER, Adela; JIN, Justin. **Impact of Automated, Connected, Electric, and Shared (ACES) vehicles on design, materials, manufacturing, and business models**. Center for Automotive Research© 2018.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1998.

SAE J3016. **Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems**. Copyright© 2018 SAE International, publicado em: jan. 2014 e revisado em: jun. 2016. Disponível em: <https://www.sae.org/standards/content/j3016_201806/>. Acesso em: 25 jan. 2020.

SANTOS, Marco Aurélio da Silva. **Eletricidade: Acionamento de motores elétricos**. Brasil Escola. 2020. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/eletricidade-acionamento-motores-eletricos.htm>>. Acesso em: 16 fev. 2020.

VIEIRA, João Paulo Abreu, *et al.* **Controladores fuzzy aplicados ao conversor de geradores de indução duplamente excitados em sistemas eólicos integrados a sistemas de potência**. Sba Controle & Automação, Natal, v. 18, n. 1, mar. 2007. p. 115-126. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-17592007000100009&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 19 jan. 2020.

ZIMIC, Nikolaj; MRAZ, Miha. **Decomposition of a complex fuzzy controller for the truck-and-trailer reverse parking problem**. Mathematical and Computer Modelling, v. 43, n. 5-6, 2006. p. 632-645.

ZONATTO, Eduardo. **Algoritmo de um controlador lógico fuzzy do motor à combustão interna de um veículo convencional convertido para uma arquitetura elétrica híbrida**. 2018. 85 p. Monografia de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

APÊNDICE A: DEFINIÇÃO DAS FUNÇÕES DE INFERÊNCIA

Funções de inferência primeira etapa do controlador HFS

Distância em x:

Nome do conjunto difuso	a	b	c	d
Esquerda	-180	-100	-100	-30
Esquerda_Reto	-40	-21	-21	-2
Reto	-4	0	0	4
Direita_Reto	2	21	21	40
Direita	30	100	100	180

Ângulo da carreta:

Nome do conjunto difuso	a	b	c	d
Esquerda_Desviar	-200	-2	-2	-1,578
Esquerda	-2	-1,578	-1,578	-0,8
Esquerda_Reto	-1,417	-0,8666	-0,8666	-0,15
Reto	-0,3	0	0	0,3
Direita_Reto	0,15	0,8666	0,8666	1,417
Direita	0,8	1,578	1,578	2
Direita_Desviar	1,578	2	2	200

Ângulo entre carretas desejado:

Nome do conjunto difuso	a	b	c	d
Mf4	-1,89	-1,57	-1,4	-1,3
Mf10	-1,3	-1	-1	-0,733
Mf2	-0,783	-0,783	-0,783	-0,433
Mf8	-0,4	-0,4	-0,4	-0,1
Mf1	-0,01	0	0	0,01
Mf3	0,1	0,4	0,4	0,4
Mf7	0,433	0,783	0,783	0,783
Mf9	0,733	1	1	1,3
Mf6	1,3	1,4	1,57	1,89

Funções de inferência segunda etapa do controlador HFS

Diferença entre *setpoint* e ângulo desejado:

Nome do conjunto difuso	a	b	c	d
Neg	-3,142	-3,142	-1,571	-0,1
Zero	-0,1	0	0	0,1
Posi	0,1	1,571	3,142	3,142

Ângulo de esterçamento:

Nome do conjunto difuso	a	b	c	d
Esquerda	-1,05	-1,05	-0,9	-0,05526
Reto	-0,06684	0	0	0,06684
Direita	0,05526	0,9	1,05	1,05