

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Paola Ramires Godoi

**Sistema de Decisão Baseado em
Algoritmos Inteligentes para o
Gerenciamento do Fluxo de Trens**

Paola Ramires Godoi

**Sistema de Decisão Baseado em
Algoritmos Inteligentes para o
Gerenciamento do Fluxo de Trens**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Ubaldo Guazzelli

São Carlos - SP

2024

Dedico este trabalho a ...

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço imensamente aos meus pais, José Ricardo e Roziane, e ao meu irmão Lucas. Somente nós sabemos o que se passa dentro de casa. As vivências, os momentos de superação e até mesmo as brigas me moldaram e continuarão me moldando. Obrigada, meus pais, por nunca me deixarem desistir da Engenharia e por sempre me oferecerem o apoio necessário para seguir em frente. Em momentos de dúvida e desânimo, foi a força de vocês que me fez mais forte e me incentivou a continuar.

Aos meus avós, Vô Marinho, Vó Arary, Vô José e Vó Olália, sou eternamente grata por terem me criado e por sempre me encherem de amor. Aos meus tios, tias e demais familiares, obrigada por estarem ao meu lado, proporcionando suporte e carinho em cada passo dessa jornada. Spero ter a garra para realizar todos os sonhos que a mim foram confiados, e que vocês, meus queridos, não puderam realizar. Aos meus amigos, meu muito obrigado por todo o apoio, pelas risadas e pela descontração em momentos tão necessários.

Gostaria de expressar também minha gratidão à Ferrovia. Em outubro de 2021, entrei em um mundo que mal sabia que existia, e posso afirmar que, depois de conhecê-lo, não dá vontade de sair. Tive a oportunidade de entender e aprender como cada peça se encaixa para formar o lindo e vasto quebra-cabeça que é a malha ferroviária do Brasil. Agradeço especialmente ao time de Engenharia de Operações da Rumo e ao Centro de Circulação Operacional Norte. Não poderia ter escolhido escola melhor! Sou imensamente grata aos meus gestores e a todo o time de especialistas e analistas. Sem vocês, eu ainda estaria perdida em como colocar um EPI!

Por fim, gostaria de agradecer aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFSCar pelo privilégio de estudar em uma faculdade com pessoas tão capacitadas, por me permitirem iniciar meu sonho de conhecer o mundo através do intercâmbio e por me fazerem enxergar que os nossos olhos podem brilhar por mais de uma coisa.

Muito Obrigada!

“Assim Seja”
(autor)

Resumo

Com o crescente aumento do volume de *commodities* agrícolas exportadas pelo Brasil, juntamente ao desenvolvimento das companhias logísticas, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de decisão baseado em algoritmos inteligentes para otimizar o gerenciamento do fluxo de trens nas ferrovias brasileiras. Com o objetivo de melhorar a eficiência energética e reduzir o tempo de condução, o estudo utiliza a lógica *Fuzzy* para propor um sistema de decisão que equilibre o fluxo de trens, evitando saturações nos portos, bem como falta de ativos para descarga e paradas desnecessárias. A pesquisa destaca a importância do modal ferroviário no Brasil, enfatizando suas vantagens em termos de segurança e eficiência energética. Os resultados indicam que a aplicação do sistema proposto pode levar a uma significativa melhoria na operação ferroviária, promovendo um transporte mais ágil e sustentável.

Palavras-chave: Algoritmos Inteligentes, Lógica Fuzzy, Gerenciamento de Trens, Eficiência Energética, Transporte Ferroviário. .

Abstract

With the increasing volume of agricultural commodities exported by Brazil, along with the development of logistics companies, this study presents the development of a decision-making system based on intelligent algorithms to optimize train flow management on Brazilian railways. Aiming to improve energy efficiency and reduce driving time, the research employs Fuzzy logic to propose a decision system that balances train flow, avoiding port saturations, as well as lack of assets for unloading and unnecessary stops. The study highlights the importance of the railway mode in Brazil, emphasizing its advantages in terms of safety and energy efficiency. The results indicate that the application of the proposed system can lead to significant improvements in railway operations, promoting more agile and sustainable transportation.

Keywords: Intelligent Algorithms, Fuzzy Logic, Train Management, Energy Efficiency, Railway Transport. .

Lista de ilustrações

Figura 1 – Participação da Matriz de Transporte de Países com grande extensão territorial.	23
Figura 2 – Ciclo Ferroviário	28
Figura 3 – Funcionamento MTO	30
Figura 4 – Operação Rumo.	32
Figura 5 – Etapas Fuzzy.	36
Figura 6 – Paradas por Trem.	43
Figura 7 – Funções de Pertinência de Paradas média.	44
Figura 8 – Quantidade de Restrições Ativas.	44
Figura 9 – Funções de Pertinência de Quantidade de Restrições.	45
Figura 10 – Funções de Pertinência para Saturação do Porto.	46
Figura 11 – Funções de Pertinência para o MTO.	47
Figura 12 – Ativação das Regras para $P = 22,3$ $R = 428$ restrições e $S = 20\%$ de saturação.	52
Figura 13 – Agregação das Regras para $P = 22,3$ $R = 428$ restrições e $S = 20\%$ de saturação.	52
Figura 14 – Ativação das Regras para $P = 33,1$ $R = 441$ e $S = 70\%$ de saturação.	53
Figura 15 – Agregação das Regras para $P = 33,1$ $R = 441$ e $S = 70\%$ de saturação.	53
Figura 16 – Ativação das Regras para $P = 23,3$ $R = 466$ e $S = 75\%$ de saturação.	54
Figura 17 – Agregação das Regras para $P = 23,3$ $R = 466$ e $S = 75\%$ de saturação.	54

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de MTO A->B, Tempo Estimado, e Saving Diesel.	31
Tabela 2 – Indicadores Operacionais	33
Tabela 3 – Especificação das Entradas do Sistema <i>Fuzzy</i>	41
Tabela 4 – Base de Regras para o Sistema de Gerenciamento do Fluxo de Trens .	48
Tabela 5 – Resumo de Dados de Operação de Trens	55

Lista de siglas

ANPD Autoridade Nacional de Proteção de Dados

ANTF Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários

ANTT Agência Nacional de Transportadores Terrestres

CCO Centros de Controle Operacional

CDA Método do Centro de Área

FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations

LGPD Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais

MDM Método da Média dos Máximos

MPM Método do Primeiro Máximo

MTO Minimum Time Offset

TO Trip Optimizer

THP Tempo Hora Parado

TKB Tonelada por Quilômetro Bruto

TU Tonelada Útil

Wabtec Westinghouse Air Brake Technologies Corporation

VMA Velocidade Máxima Autorizada

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Motivação e Relevância	21
1.2	Justificativa	22
1.3	Proteção de Dados	25
1.4	Objetivos	25
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	27
2.1	Ciclo	27
2.2	TO - Trip Optimizer	29
2.3	MTO - Minimum Time Offset	30
2.4	Indicadores Operacionais	32
3	LÓGICA FUZZY	35
3.1	Histórico	35
3.2	Sistema Genérico	36
4	DESENVOLVIMENTO	39
4.1	Ambiente de simulação	39
4.2	Definição das Entradas	39
4.3	Definição da Saída	41
4.4	Definição das Funções de Pertinência e Universos de Discurso	42
4.5	Definição da Base de Regras	47
4.6	Implicação	47
4.7	Método de Defuzzyficação	49
4.8	Pós Processamento	49
4.9	Implementação	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51

6	CONCLUSÃO	57
	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICES	61
APÊNDICE A	– FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA	63
APÊNDICE B	– INFERÊNCIA	65
APÊNDICE C	– ATIVAÇÃO	67
APÊNDICE D	– AGREGAÇÃO	69
APÊNDICE E	– DEFUZZIFICAÇÃO	71
APÊNDICE F	– MAIN	73

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação e Relevância

Na atualidade, pode-se dizer que o desenvolvimento, não só o econômico como também o social de um país está intrinsecamente ligado ao chamado tripé do desenvolvimento – o transporte, a logística e a comercialização - um não existe sem o outro. Nesse sentido, é trivial que, para a circulação do capital ocorrer, deve haver o planejamento, caracterizado como a comercialização, a gestão de transportes e armazenamento, caracterizado pela logística, e por fim o movimento e a estocagem das mercadorias, caracterizado pelo método de transporte, (SILVEIRA, 2022).

Em resumo, o ciclo é dado inicialmente com a parte comercial, que agiliza toda compra e venda de ativos, sendo eles os mais diversos, indo dos *commodities* aos maquinários, em seguida a logística avalia cada forma de entrega e armazenamento de uma mercadoria, levando em conta o método mais econômico e ágil e escolhendo o meio de transporte mais adequado, o qual terá a responsabilidade de operacionalizar toda a parte estratégica realizada anteriormente, fechando um ciclo.

Ou seja, o método de transporte escolhido será, não somente, o vetor entre o ponto de coleta e entrega, mas também o responsável pela segurança e armazenamento da carga e pela pontualidade na entrega, o que garantirá a satisfação do cliente.

A relevância da infraestrutura do transporte dentro do contexto do desenvolvimento é destacada quando as reestruturações econômicas vigentes, comuns ao capitalismo e em constante mudança, potencializam a circulação de mercadorias, capitais, informações e pessoas pelo espaço geográfico. Assim, o Estado e a iniciativa privada, juntos ou separados, são responsáveis pelas infraestruturas de transportes, pelo desenvolvimento e utilização das tecnologias de transportes. Segundo VIANNA (2007), a infraestrutura de transportes

é um elemento fundamental para o desenvolvimento de um país. Não é o desenvolvimento que traz uma boa infraestrutura de transportes, mas sim o cuidado e o investimento na criação e manutenção de estradas e vias de transporte que impulsionam o progresso econômico e social de uma nação.

Sendo assim, é de suma importância que o Brasil, um país que de acordo aos órgãos estatísticos Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) e Eurostat, foi o quarto país que mais produziu itens agrícolas em 2022, tendo um faturamento de aproximadamente US\$ 573 bilhões, segundo a Agrofy (2023) se mobilize ritimadamente para melhorar a infraestrutura de transporte, garantindo empregos para a população e comércio com o exterior, estando assim, sobre o tripé do desenvolvimento.

Observando os modais brasileiros, de acordo ao Agência Nacional de Transportadores Terrestres (ANTT), tem-se catalogado 5 meios de transportes de cargas oficiais, e são eles:

- Ferroviário;
- Rodoviário;
- Aeroviário;
- Marítimo;
- Dutoviário;

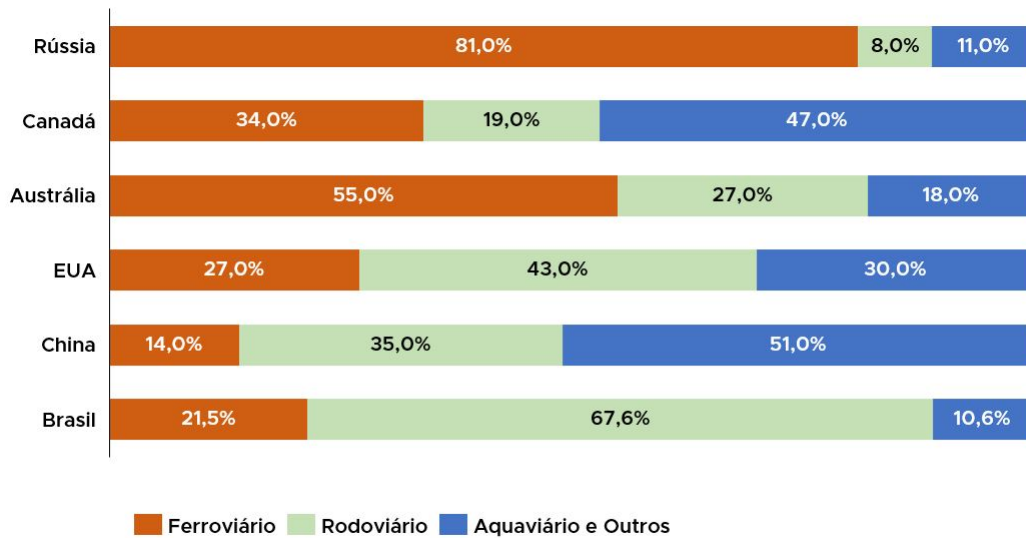
De acordo ao Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF), mais de 40% dos sólidos agrícolas destinadas à exportação são transportadas pelo modal ferroviário no Brasil. E, em 2022, as ferrovias ampliaram sua participação na matriz de transporte, contabilizando mais de 20% do mercado logístico, ficando atrás, somente, do modal rodoviário. Entretanto, o Brasil ainda apresenta baixa densidade de malha quando comparado a países com vasta extensão territorial. Como é possível verificar na Figura 1, apenas 21,5% dos transportes são do tipo ferroviário. Enquanto que países como Austrália, Canadá e Rússia, possuem mais de 301% de sua matriz composta pelo modal ferroviário ANTF (2023b).

Embora o Brasil conte com mais de 31.000 km de linhas férreas aptas à circulação de cargas, possua o 40º maior porto do mundo - Porto de Santos - segundo Autoridade Portuária do Porto de Santos (2023), em 2022. O modal ferroviário, apesar de ser um dos meios mais ecológicos de transporte de carga, enfrenta desafios em seu processo de expansão.

1.2 Justificativa

O modal ferroviário é o método de transporte mais promissor do Brasil, além de ser um dos meios mais seguros por possuir sua própria infraestrutura, a mesma que

Figura 1 – Participação da Matriz de Transporte de Países com grande extensão territorial.



Fonte: ANTF (2023b).

permite uma aderência entre o ativo de transporte e os trilhos, não compete com outros tipos de transporte, como por exemplo os modais rodoviários, que enfrentam diariamente engarrafamentos com carros, motos, caminhões, etc.

Além disso, é o método de transporte mais ecológico, segundo a ANTF (2023a) um trem de 120 vagões tira cerca de 368 caminhões das rodovias do Brasil, o que representou, aproximadamente, 2,9% das emissões de carbono em 2022 no Brasil, contra os 79% das emissões geradas pelo modal rodoviário. Não obstante, a ferrovia é o modal com melhor eficiência energética, ou seja, consegue transportar mais carga com menos diesel, fechando o ano de 2022 com uma eficiência de 3,23 l/ mil TKU (Tonela por Kilômetro útil).

A eficiência energética é um dos maiores paradoxos das companhias logísticas que utilizam trens como meio de transporte. Apesar de possuírem a melhor eficiência energética por transportar mais carga consumindo a menor quantidade de diesel possível, lutam contra o orçamento, tendo em vista que o diesel é o maior gasto que as companhias ferroviárias têm.

Entretanto, uma boa eficiência energética está diretamente relacionada a uma boa circulação de trens. Um enorme desafio dos Centros de Controle Operacional (CCO), que lidam diariamente com situações como a saturação da malha, filas no Porto, ou também conhecidos como "Plug" do Porto e a falta de ativos nos terminais para a recarga. Problema esse que o presente estudo irá abordar e explorar, visando o potencial aprimoramento do fluxo de trens através de um sistema de pilotagem para a Otimização da Circulação de Trens com o auxílio de ferramentas tecnológicas já existentes nas locomotivas da atualidade.

Atualmente, a distribuição dos trens ao longo da malha ferroviária é feita de formal

manual, ou seja, espera-se que as situações acima, como saturação e falta de ativos ocorram para que decisões sejam tomadas, inclusive há ferramentas que não estão tendo seu potencial explorado.

A tomada de decisões manual prolonga o processo de distribuição dos trens, o que pode resultar em atrasos na entrega do frete, congestionamentos na malha ferroviária, aumento do consumo de diesel devido ao maior número de paradas para ajustar o fluxo do trecho e desgaste da equipe responsável. Sem um processo automatizado, a equipe precisa considerar todas as variáveis possíveis, o que dificulta a operação e compromete a fidelidade e confiança do cliente.

Por outro lado, ao utilizar um sistema automatizado, ganha-se agilidade no processo sendo possível a redução no tempo de tomada de decisões, a redução dos gastos desnecessários com diesel e horas de trabalho dos colaboradores e a satisfação dos clientes que terão suas cargas sendo transportadas por um modal mais eficiente.

Em resumo, a transição de sistemas manuais para sistemas automatizados de controle tem se mostrado uma tendência inevitável e benéfica em diversas áreas, incluindo o gerenciamento ferroviário. Os sistemas automatizados oferecem inúmeras vantagens sobre os métodos manuais, como maior precisão, eficiência operacional e capacidade de processamento de grandes volumes de dados em tempo real. Enquanto os sistemas manuais dependem da intervenção humana, o que pode levar a atrasos e erros, os sistemas automatizados são projetados para operar com mínima intervenção, assegurando respostas rápidas e precisas às variáveis dinâmicas do ambiente, (OGATA, 2010). Essa transição não apenas melhora a eficiência energética e reduz custos operacionais, mas também aumenta a segurança e a confiabilidade das operações, fatores críticos no setor ferroviário.

Ao considerar a implementação de algoritmos inteligentes para a tomada de decisão, é importante explorar uma variedade de métodos disponíveis. Algoritmos como redes neurais artificiais, aprendizado de máquina supervisionado e não supervisionado e algoritmos genéticos têm sido amplamente utilizados para otimizar processos complexos. Cada um desses métodos possui suas próprias vantagens e limitações, dependendo do contexto de aplicação e dos objetivos específicos do sistema. Por exemplo, redes neurais são eficazes em reconhecer padrões complexos, enquanto algoritmos genéticos são úteis para otimização em espaços de solução grandes e complexos (MITCHELL, 1998).

Entre esses métodos, os sistemas inteligentes, e em particular os sistemas baseados em lógica fuzzy, destacam-se por sua capacidade de lidar com incertezas e imprecisões inerentes a muitos processos industriais. A lógica fuzzy permite a modelagem de sistemas complexos sem a necessidade de modelos matemáticos precisos, tornando-os ideais para aplicações onde as condições são variáveis e difíceis de prever (ZADEH, 1973). Ao integrar a lógica fuzzy com outras técnicas de inteligência artificial, é possível desenvolver sistemas de controle que não apenas respondem rapidamente às mudanças do ambiente, mas também aprendem e se adaptam a novas condições operacionais, proporcionando

uma vantagem competitiva significativa no gerenciamento de fluxos ferroviários.

1.3 Proteção de Dados

Antes de avançar no presente trabalho, é essencial abordar a importância da Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD) no contexto da pesquisa realizada. A LGPD, instituída pela Lei nº 13.709/2018 e controlada pela Autoridade Nacional de Proteção de Dados (ANPD), regulamenta o tratamento de dados pessoais no Brasil, com o objetivo de proteger a privacidade e os direitos fundamentais dos titulares dos dados.

Dado que este projeto se baseia em dados específicos do setor logístico da Rumo Logística, que envolvem aspectos críticos como precificação e estratégias competitivas, é necessário garantir a proteção dessas informações. Para mitigar riscos associados à divulgação de informações sensíveis que poderiam impactar a competitividade da empresa, optou-se por aplicar técnicas de pseudonimização. A pseudonimização consiste na substituição de identificadores diretos, como nomes de clientes ou valores de contratos, por códigos ou pseudônimos que dificultam a identificação direta dos titulares de dados.

Embora a pseudonimização não torne os dados completamente anônimos — já que eles ainda podem ser reidentificados mediante o uso de informações adicionais específicas —, ela reduz significativamente os riscos de exposição e garante maior segurança durante a manipulação e o compartilhamento de informações sensíveis no contexto desta pesquisa. Assim, a adoção dessa técnica está alinhada com as diretrizes da LGPD, que incentiva o uso de medidas de segurança para proteger dados pessoais, especialmente quando se trata de dados empresariais sensíveis que podem impactar a competição de mercado.

Essa abordagem permite que o estudo avance com rigor científico e proteção adequada dos dados, assegurando que a privacidade e a confidencialidade sejam preservadas, sem comprometer a integridade da pesquisa (ANPD, 2023).

1.4 Objetivos

O presente trabalho visa propor uma alternativa à má distribuição de trens ao longo da malha ferroviária com o viés de eficiência energética, saindo de uma tomada de decisões reativa para uma preditiva, possibilitando um fluxo equilibrado, ou seja, que os pontos de carga e descarga não se encontrem saturados ou vazios.

Em resumo, irá ser proposto um modelo, através de um Sistema *Fuzzy* desenvolvido a partir do conhecimento de especialistas, no qual as companhias evitem perder o faturamento de cargas por falta de ativos nas pontas de carregamento e que sempre hajam trens carregados disponíveis nos Portos, prontos para exportar ou abasecerem armazéns.

E para alcançar o objetivo geral do trabalho que é um Modelo de Pilotagem de Trens, através de Redes Inteligentes, foram apontados os seguintes objetivos específicos:

- Detectar todas as variáveis de interesse através da análise de dados históricos, ou seja, analisar e implementar todos os pontos que interferem ativamente no problema, que é a falta de um fluxo equilibrado de trens;
- Realizar, a fundo, uma investigação sobre Sistemas *Fuzzy*, com a finalidade de utilizar a ferramenta de forma eficiente e assertiva;
- Propor uma solução baseada em Sistemas *Fuzzy*, que busque melhorar o fluxo de trens nas malhas ferroviárias;
- Analisar os resultados e expor os ganhos em eficiência energética e Tempo de Trânsito das companhias, conceito que será definido no Capítulo 2.

No Capítulo 2, serão abordados os fundamentos teóricos sobre ferrovia, com explicações detalhadas sobre os tópicos mais relevantes para o bom andamento do projeto. Este capítulo proporcionará uma compreensão sólida das bases técnicas e operacionais que sustentam o sistema ferroviário.

O Capítulo 3 será dedicado ao Sistema *Fuzzy*, no qual serão explicadas as funcionalidades, vantagens e conceitos de um Sistema *Fuzzy* genérico. Este capítulo esclarecerá como os sistemas *Fuzzy* podem ser aplicados para melhorar a tomada de decisões em ambientes complexos.

O Capítulo 4 focará no desenvolvimento do projeto, detalhando todas as entradas e saídas do sistema proposto, seus impactos no problema abordado e como é realizado o método de aferição de cada variável.

Finalmente, nos Capítulos 5 e 6, será feita uma síntese dos principais resultados e contribuições deste trabalho, destacando como a aplicação de um sistema *Fuzzy* pode otimizar a tomada de decisões no setor ferroviário. Serão discutidas as implicações práticas dos achados, as limitações enfrentadas durante o desenvolvimento do projeto, e serão apresentadas sugestões para trabalhos futuros que possam ampliar ou aprofundar o conhecimento nesta área, promovendo uma melhoria contínua na eficiência e na operação das ferrovias.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

Ao abordar o tema ferrovia, é essencial tratar de diversos conceitos técnicos e específicos. Para garantir o bom andamento deste projeto, serão discutidos conceitos relacionados a duas grandes áreas ferroviárias: operação e tecnologia. A operação ferroviária, que envolve toda força humana para o transporte de cargas de maneira eficiente e segura, depende das tecnologias embarcadas nas locomotivas. Portanto, esta seção começará com uma análise dos conceitos relacionados ao ciclo da operação e, em seguida, explorará as tecnologias presentes nas locomotivas.

2.1 Ciclo

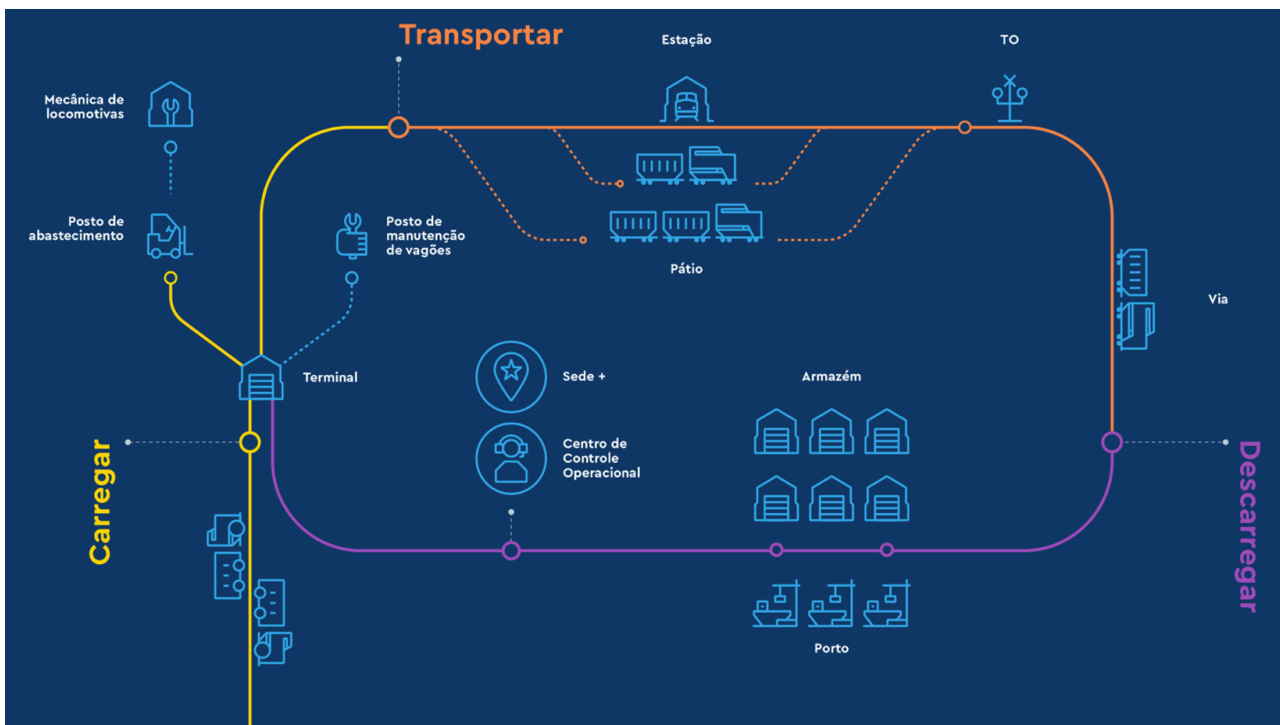
O conceito de Ciclo é de importância para qualquer área que gere algum valor ou produto, para a ferrovia não seria diferente. Para as companhias de logística, que utilizam trens como modalidade de transporte, a geração de valor, que compreende captar uma carga, armazená-la e levá-la até o destino final mantendo a segurança dos ativos e da carga com agilidade, se divide em duas etapas principais, o Giro e o Tempo de Trânsito, (OLIVEIRA, 2007).

- Giro: é considerado o tempo que uma composição - Conjunto de Locomotivas mais vagões - leva para ser carregada ou descarregada (PIRES; ZAGHENI, 2015). Essa etapa ocorre, na maioria das vezes, nas pontas do Ciclo;
- Tempo de Trânsito: ou também conhecido como *Transit Time*, é tempo que um trem leva para ir de um ponto de carga a um ponto de descarga, ou de um ponto de descarga a um ponto de carga, o que de acordo a OLIVEIRA (2007) podem ser

chamados de Tempo de Trânsito Carregado e Tempo de Trânsito Vazio, respectivamente.

Sendo assim, pode-se dizer que o Tempo de Trânsito é a soma entre o tempo de condução, o tempo que uma composição passou, efetivamente, em movimento, ou seja com velocidade diferente de zero e tempo parado, o tempo em que a velocidade foi igual a zero. O tempo parado por ser gerado inúmeras ocasiões, sejam elas cruzamento entre trens, abastecimento de locomotivas, reformas na via permanente, acidentes ou incidentes, avaria nos ativos, entre outras. O Ciclo pode ser melhor visualizado na Figura 2.

Figura 2 – Ciclo Ferroviário



Fonte: (RUMO LOGÍSTICA, 2021)

Com a Figura 2 evidenciam-se as etapas do ciclo. Na qual, com a linha amarela fica evidente a etapa de carga de uma composição, na qual os vagões são carregados, as locomotivas são abastecidas e se necessário os ativos passam por manutenções. Na etapa de linha laranja, é realizado o transporte, do ponto de origem até o ponto de destino e em roxo tem-se se a descarga, que pode ser realizada diretamente dentro dos porões dos navios, ou em armazéns para a estocagem.

Com base no que foi apresentado nos capítulos anteriores, fica evidente que a melhora no ciclo ferroviário deve ser realizada como um todo para resultados mais expressivos. Entretanto, a maior parte do tempo despendido se dá no Tempo de Trânsito. E ao se garantir um bom Tempo de Trânsito — que esteja dentro das metas propostas ou até menor — uma companhia ferroviária assegura não apenas a entrega da carga no porto de

forma mais rápida, mas também otimiza o deslocamento de ativos para serem carregados. Essa eficiência no transporte ferroviário é crucial para manter a competitividade e atender às demandas logísticas com precisão e agilidade.

Sobretudo, o foco deste projeto será melhorar o tempo de condução, pois é nessa etapa que se pode atuar de maneira mais eficaz. Enquanto o trem está parado, as opções de intervenção são limitadas; por isso, os esforços se concentram na melhoria da eficiência durante o movimento. A seguir, será apresentada a ferramenta utilizada para alcançar a redução desse tempo de condução, permitindo uma operação mais ágil e econômica.

2.2 TO - Trip Optimizer

O Trip Optimizer (TO) é uma ferramenta de padronização para a condução de trens da Westinghouse Air Brake Technologies Corporation (Wabtec), uma empresa que se concentra em tecnologias para o setor ferroviário.

O TO da Wabtec é um sistema avançado de otimização de viagens instalado em locomotivas, projetado para melhorar a eficiência de operações ferroviárias. Utilizando dados como relevo do trecho, composição do trem (peso, tamanho, quantidade de ativos), origem e destino, e restrições de velocidade, imputados em uma central de dados que se conecta as locomotivas, o sistema gera um plano de viagem otimizado.

O funcionamento eficaz do TO depende de várias condições: ele opera principalmente em velocidades superiores a 18 km/h e requer uma conexão estável à internet ao longo da malha ferroviária. Isso é essencial, pois a comunicação contínua entre a locomotiva e a central, onde os dados são processados e armazenados, ocorre, majoritariamente, através dessa rede, mas pode ocorrer por satélite também.

Ou seja, determina um perfil de velocidade ideal para determinada rota que tem como princípios padronizar a condução garantindo uma boa eficiência energética, velocidades mais constantes e mais próximas a Velocidade Máxima Autorizada (VMA) e a preservação dos ativos, como por exemplo os engates e freios. De acordo a WABTEC (2021), uma viagem com o TO ativo na maior parte do tempo, garante uma economia de 10% de diesel.

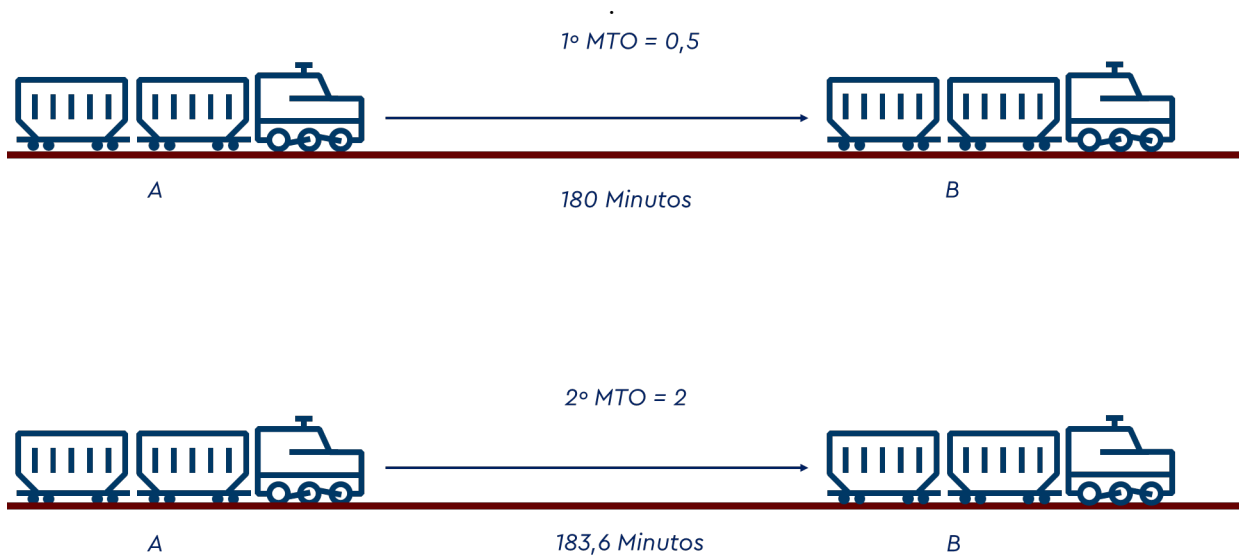
Pensando nisso, a Wabtec desenvolveu, dentro do sistema TO, níveis de modulação da ferramenta, o Minimum Time Offset (MTO). Em resumo, elencou dois pontos extremos: o modo velocidade, representado pelo MTO 0.5 e o modo economia, representado pelo MTO 10; sobretudo, tem-se módulos intermediários entre os dois extremos. O módulo exposto será abordado a seguir.

2.3 MTO - Minimum Time Offset

Segundo a WABTEC (2021), o Minimum Time Offset, ou também, Intervalo Mínimo de Tempo MTO é um parâmetro de tempo que o TO utiliza para alcançar melhores resultados em tempo de condução e eficiência energética. O MTO é expresso como uma porcentagem do tempo de operação do trem para uma determinada viagem. A operação do MTO pode ser melhor visualizada na Figura 3.

Imaginando um cenário, com percurso de ponto de origem A e ponto de destino B, no qual gasta-se 180 minutos com um MTO de 0.5 (modo velocidade), ao realizar uma alteração para o MTO de 2, acrescenta-se 2% do tempo estipulado ao modo velocidade, ou seja, 3.6 minutos.

Figura 3 – Funcionamento MTO



Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 1 ilustra como funciona o acréscimo da porcentagem ao tempo de operação de um trecho genérico de A a B, bem como a faixa do *saving* em diesel pela utilização de cada ponto do MTO, os valores serão pseudonomizados, tópico discutido na seção 1.3, por conta da LGPD. Supondo que o trem consuma 100 litros para ir do ponto A ao ponto B no modo 0.5, utilizando o modo 10 ele utilizará metade, em contrapartida estará no modo economia, ou seja, terá acrescido 10% no seu tempo de condução base.

Atualmente, o modelo de tomada de decisões é feito de forma manual, utilizando principalmente as modulações de modo velocidade (0,5) e modo economia (10). Isso faz com que a ferramenta não seja utilizada em todo o seu potencial. A análise da tabela evidencia que muitos outros modos podem ser explorados, o que pode colaborar significativamente com a eficiência energética. Ao adotar uma abordagem mais abrangente e automatizada, será possível maximizar o uso dos diferentes modos disponíveis, melhorando o desempenho e reduzindo o consumo de energia.

MTO A -> B	Tempo Estimado (Min)	Saving Diesel (L)
0,5	x	Base
1	$1\% \times x + x$	Base
2	$2\% \times x + x$	20
3	$3\% \times x + x$	20
4	$4\% \times x + x$	40
5	$5\% \times x + x$	40
6	$6\% \times x + x$	40
7	$7\% \times x + x$	40
8	$8\% \times x + x$	50
9	$9\% \times x + x$	50
10	$10\% \times x + x$	50

Tabela 1 – Tabela de MTO A->B, Tempo Estimado, e Saving Diesel.

O modo velocidade gera um alto desempenho em tempo de condução e é útil quando o trecho necessita de uma alta vazão de trens, ou seja, quando a carga precisa chegar mais rápido ao destino final. Em contrapartida, é uma configuração que tem um maior consumo de diesel, contribuindo com a diminuição da eficiência energética.

Já no modo economia, os trens não desenvolvem altas velocidades e por isso economizam diesel, aumentando a eficiência energética.

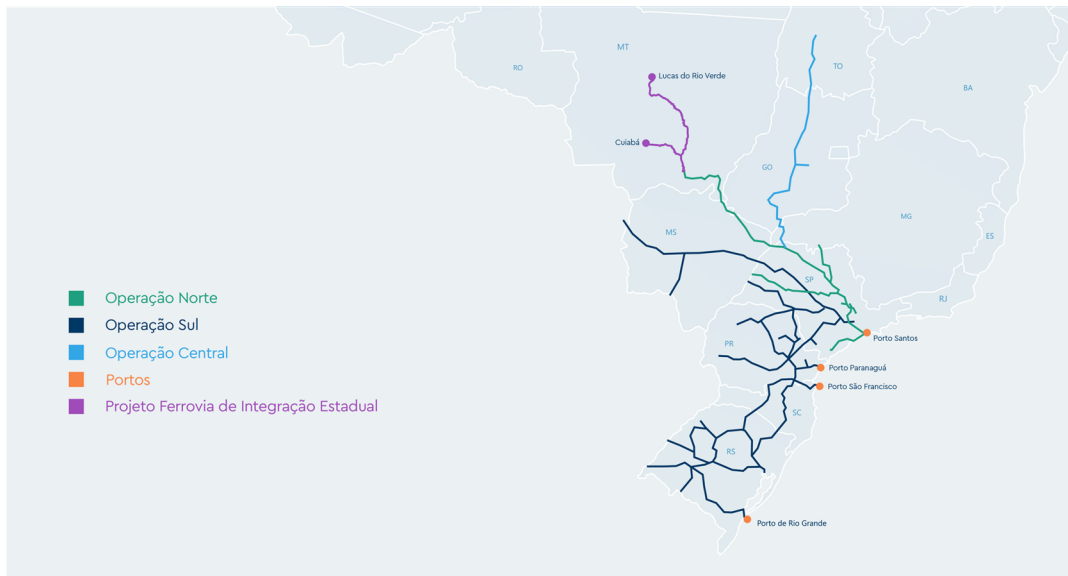
A capacidade do Minimum Time Offset (MTO) e todo o histórico de dados armazenados envolvendo o uso da ferramenta, será a base do presente projeto, visto que através dele será possível treinar um sistema *Fuzzy*, que retornará o melhor ponto de modulação da ferramenta, que levará em conta eficiência energética e tempo de condução, do MTO.

Para que seja possível utilizar os níveis de modulação do Trip Optimizer (TO), em primeiro lugar deve ocorrer a habilitação do mesmo, seguindo as premissas de velocidades acima de 18 km/h e um trecho com disponibilidade de internet. Ademais, a escolha de um ponto de MTO é definida trecho a trecho e por tipo de trem, ou seja, quando altera-se o MTO do ponto 2 para o ponto 10 é necessário escolher um trecho específico, ou todos os trechos, e um tipo de trem específico, ou todos os tipos de trens.

Para entendimento, conceito de dividir uma malha ferroviária em trechos ou segmentos é uma prática comum na administração ferroviária, utilizada para facilitar o gerenciamento de operações, manutenção, planejamento estratégico e expansão, e até mesmo implementar medidas de segurança dependendo das características do local. Essas divisões não seguem um padrão único e podem variar dependendo da ferrovia, do país e das necessidades operacionais ou regulatórias específicas.

Na empresa Rumo Logística, a maior operadora logística do Brasil, que utiliza o modal ferroviário e que possui mais de 14 mil km em linhas ferroviárias, distribuídas entre três principais operações, a norte, a central e a sul, há a divisão em trechos, (RUMO LOGÍSTICA, 2023). Um panorama geral da operação Rumo, empresa fornecedora dos dados e base de estudos para o presente projeto, pode ser visualizado na Figura 4.

Figura 4 – Operação Rumo.



Fonte: Adaptado de (RUMO LOGÍSTICA, 2023).

Com a imagem, é possível visualizar a divisão das três operações, os três maiores portos do Brasil em laranja e o projeto de expansão estadual de Lucas do Rio Verde, em roxo. Vale ressaltar que a Operação Norte, objeto de estudo do presente trabalho, por ser a operação com locomotivas com a tecnologia TO instaladas, é subdividida em 6 trechos. Isso significa que ao longo do trajeto de um trem, tem-se 6 oportunidades de alteração do ponto do MTO.

Portanto, realizando o estudo sobre os indicadores operacionais existentes para decidir qual a metodologia de implementação dos algoritmos inteligentes. E levando em conta que os indicadores operacionais das companhias ferroviárias, que serão as variáveis de entrada e saída, operam na forma analógica, ou seja, possuem um nível de imprecisão e incerteza, a metodologia escolhida foi a Lógica *Fuzzy*, que será melhor definida na Seção 3.

2.4 Indicadores Operacionais

No contexto da operação ferroviária, a análise e o monitoramento de indicadores desempenham um papel crucial na otimização de processos e na tomada de decisões estratégicas. Além dos indicadores previamente mencionados, este capítulo se propõe a retomar, introduzir e detalhar novos parâmetros que se mostram igualmente relevantes para uma visão sistêmica da operação e que, posteriormente, serão necessários para a evolução da ferramenta a ser desenvolvida, os indicadores podem ser visualizados, de maneira consolidada, na Tabela 2.

Tabela 2 – Indicadores Operacionais

Indicador	Descrição
Tempo de Trânsito	É o tempo que um trem leva para ir de um ponto de carga a um ponto de descarga, ou de um ponto de descarga a um ponto de carga, sendo a soma do tempo de condução e a soma do tempo hora parado (OLIVEIRA, 2007).
Tempo de Condução	É o todo o tempo em que houve movimento do trem, ou seja, que a velocidade foi diferente de zero (OLIVEIRA, 2007).
Tempo Hora Parado (THP)	É todo o tempo em que não houve movimento do trem, ou seja, que a velocidade foi igual a zero (OLIVEIRA, 2007).
Saturação da Malha	A saturação de malha mede a capacidade operacional de uma linha férrea em relação ao volume de tráfego que ela suporta. Ele avalia o quanto da capacidade total de uma linha está sendo utilizada, considerando tanto as condições normais quanto possíveis atrasos ou interrupções (BEŠINOVIĆ; GOVERDE, 2018).
Velocidade Máxima Autorizada (VMA)	Segundo o Regulamento Operacional da Rumo Logística (2020), a velocidade máxima autorizada em um trecho específico pode variar em função do tipo de Via Permanente, do tipo de Material Rodante, das condições de Segurança Operacional, por exemplo se é trecho urbano ou rural e do peso ou tipo de carga transportada.
Restrições de Velocidade	Segundo o Regulamento Operacional da Rumo Logística (2020), trata-se de uma limitação temporária imposta durante a operação. Quando uma restrição de velocidade é aplicada, a nova velocidade máxima permitida VMA para o trecho deve ser rigorosamente seguida, não podendo ser excedida. Restrições de velocidade podem acontecer por vários motivos, sendo eles obras na via, implementação de tecnologias de sinalização ferroviária, ou até mesmo períodos de altas ou baixas temperaturas, entre outros.
Velocidade Média	Segundo o Regulamento Operacional da Rumo Logística (2020), a velocidade média de um trem é calculada com base no tempo despendido para percorrer uma determinada distância, levando em consideração as paradas ao longo do trajeto. Portanto, quanto mais paradas ocorrerem em um trecho específico, menor será a velocidade média do trem.
Velocidade de Cruzeiro	Segundo o Regulamento Operacional da Rumo Logística (2020), refere-se à velocidade média mantida por um trem enquanto está em movimento contínuo, sem considerar as paradas ao longo do trajeto.
Aderência a VMA	Segundo o Regulamento Operacional da Rumo Logística (2020), significa a taxa com que a velocidade desenvolvida por um trem fica próxima a velocidade máxima autorizada. Tanto para uma condução desenvolvida manualmente, ou seja, por um maquinista, quanto automaticamente, com a utilização do TO, o indicador utilizado é o mesmo.

Capítulo 3

Lógica Fuzzy

3.1 Histórico

Por muito tempo a lógica binária determinava a certeza dos conjuntos, no sentido de um elemento estar ou não estar em determinado conjunto. Tal prática, por vezes, excluía um universo de possibilidades, o que não reflete a realidade de um problema, seja ele qual for.

A partir de 1920 os conceitos da lógica binária, que dividiam elementos em dois únicos conjuntos deram espaço aos graus de pertinência com Jan Lukasiewicz (1878-1956), que introduziu a ideia de que um mesmo elemento poderia estar em mais de um conjunto, podendo pertencer mais ou menos a um determinado conjunto. Posteriormente, em 1965, houve a primeira publicação com o nome *Fuzzy*, com Lotfi Asker Zadeh (1921 - 2017) que unificou os conceitos da lógica clássica à lógica proposta por Lukasiewicz, averiguando a eficácia para a resolução de problemas de natureza industrial, (RIGNEL; CHENCI; LUCAS, 2011).

E foi entre as décadas de 70 e 80 que o conceito *Fuzzy* se difundiu, quando os professores Ebrahim Mamdani e Seto Assilian controlaram uma máquina a vapor aplicando o raciocínio *Fuzzy*, (JANTZEN, 2007).

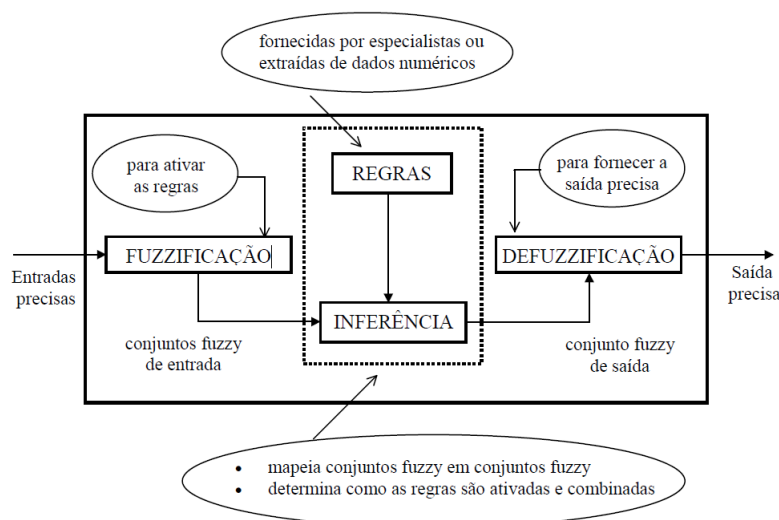
Por hora, define-se Lógica *Fuzzy* como a característica de atribuir a máquinas ou objetos sem sentimentos, a forma humana de tomar decisões, adotando a capacidade de processar informações imprecisas e aproximadas. No qual o tratamento dos dados se dá sobre uma base qualitativa, ou seja, uma base de regras com adjetivos expressos por termos linguísticos e não quantitativa, uma base de números. Atribui-se uma incerteza a modelagem dos problemas, o que possibilita uma semelhança ao mundo real, averiguando todas as possibilidades para a resolução do mesmo (TANSCHKEIT, 2004).

3.2 Sistema Genérico

A abordagem adotada para o presente trabalho será a de Mamdani, o qual dividiu um sistema *Fuzzy* em 5 etapas, que podem ser visualizadas na Figura 5.

1. Entradas precisas;
2. Fuzzificação;
3. Inferência;
4. Defuzzificação;
5. Saídas precisas;

Figura 5 – Etapas Fuzzy.



Fonte: Tanscheit (2004).

Na etapa das entradas precisas ocorre a entrada de valores, muitas vezes resultados de medições ou observações que vêm como um conjunto de dados ou gráficos, que, na maioria das vezes, precisam ser filtrados, quantizados (extração valores relevantes para o estudo) e normalizados. Sendo possível fixar um universo de discurso, ou seja, um valor máximo e mínimo para os valores de entrada.

Na etapa das entradas precisas os valores ainda não estão associados às regras linguísticas, essa associação acontece na Fuzzificação; etapa em que valores numéricos são associados a termos linguísticos por meio dos graus de pertinência, valores que dirão o quanto uma entrada pertence ou não ao termo linguístico.

A terceira etapa consiste no processo de inferência de regras. Essa etapa pode subdividir-se em mais 4 etapas. A etapa de inferência depende de regras e através de uma base de regras iniciam-se as etapas intermediárias:

1. Ativação;
2. Combinação dos Conjuntos;
3. Implicação;
4. Agregação;

As bases de regras podem ser concebidas pelo conhecimento de especialistas no assunto ou extraída através da análise de dados numéricos. Nessa etapa há a determinação de quais regras serão ativadas com base nos valores de entrada, para então calcular os valores de saída.

Após as inserção dos valores de entrada no sistema *Fuzzy* será iniciado o processo de inferência. A primeira fase se dará pela ativação das regras, ou seja, serão determinadas quais regras serão ativadas, o que, dependendo do grau de pertinência, pode fazer com que a entrada ative uma ou mais regras. Sendo assim, inicia-se a fase da combinação dos conjuntos, que consiste em combinar os valores das variáveis de entrada entre si para determinar o grau de ativação de cada regra.

Aqui, são combinados os graus de pertinência das entradas como por exemplo, velocidade alta e massa grande, usando operações lógicas *Fuzzy*, como o operador "mínimo", representado pelo operador lógico "E". Isso significa que a regra só será ativada com a força da menor pertinência entre as variáveis. Por exemplo, se a velocidade pertence ao conjunto "alta" com grau 0,7 e a massa pertence ao conjunto "grande" com grau 0,8, a combinação dessas entradas pode resultar em uma ativação da regra com força 0,7 (mínimo entre 0,7 e 0,8).

O operador lógico "OU" também é utilizado; entretanto, operador "máximo". Por exemplo se velocidade é alta ou a massa é grande, leva-se em consideração o valor de maior pertinência entre os antecedentes, no caso citado acima, o grau de ativação da regra seria 0,8 (máximo entre 0,7 e 0,8) (ROSS, 2005).

A etapa da combinação dos antecedentes, combinada a fase de implicação, representada pelo operador "ENTÃO" realiza o corte do grau de inferência no conjunto a ser ativado. Utilizando, um exemplo genérico, com o operador mínimo, tem-se a implicação:

Se velocidade é "alta" e massa é "grande" então pressão é "elevada".

A última etapa dentro do processo de inferência das regras se dá pela agregação das mesmas. Como dito anteriormente, um entrada pode pertencer a mais de um conjunto, variando o seu grau de inferência em cada conjunto. Sendo assim, ocorre a junção dos graus de pertinência de cada uma das saídas encontradas.

Saindo do processo de inferência, o resultado ainda não se encontra no formato de um número preciso e sim uma região *Fuzzy*, ou seja, uma região com os possíveis valores em que a saída precisa pode se encontrar. Partindo disso, ocorre a etapa da Defuzzificação.

Defuzzificação é o processo de transformar uma região *Fuzzy* em um valor numérico e existem alguns métodos para que essa transformação ocorra:

- Método do Centro de Área (CDA): Calcula o centroide da área sob a curva da função de pertinência formada a partir da agregação das saídas;
- Método da Média dos Máximos (MDM): Calcula a média dos valores de saída que têm o grau de pertinência máximo;
- Método do Primeiro Máximo (MPM): Escolhe o valor de saída que tem o grau de pertinência máximo;

Por aprensetar uma saída mais equilibrada e que leva em conta todos os valores de saída e suas pertinências a partir de uma ponderação, o método escolhido para o presente projeto será o CDA. A Equação 1 pode ser visualizada abaixo:

$$\text{CDA} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \mu(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)} \quad (1)$$

onde:

- x_i são os valores das saídas discretas do universo de discurso.
- $\mu(x_i)$ é o grau de pertinência do valor x_i .

Sendo assim, é dessa forma que se configura um sistema *Fuzzy*.

Capítulo 4

Desenvolvimento

4.1 Ambiente de simulação

O ambiente de simulação do MATLAB, amplamente utilizado em projetos de engenharia, é uma poderosa ferramenta para a modelagem e análise de sistemas *Fuzzy*. Através de uma interface intuitiva e integrada, o MATLAB permite a criação de sistemas complexos, facilitando a visualização das funções de pertinência, para várias entradas e várias saídas. Essa visualização é essencial para compreender como os dados de entrada são processados e convertidos em saídas, de acordo com as base de regras estabelecidas.

Uma das grandes vantagens do MATLAB é a sua capacidade de gerar gráficos detalhados que representam as regiões fuzzyficadas. Essas regiões são áreas críticas onde as regras são aplicadas, permitindo a visualização clara de como o sistema interpreta e processa informações incertas ou imprecisas. Além disso, o MATLAB oferece a possibilidade de ajustar as funções de pertinência de forma interativa, garantindo que o Sistema *Fuzzy* seja otimizado para obter o desempenho desejado.

4.2 Definição das Entradas

O sucesso de um sistema *fuzzy* depende fortemente das entradas fornecidas a ele, pois são essas entradas que determinam como o sistema responderá e as conexões entre elas levarão a tomada de decisões. Neste capítulo, serão exploradas, detalhadamente, as entradas do sistema *fuzzy* proposto, abordando sua definição, formas de medição e impacto no problema em questão. Pode-se associar o problema da má distribuição de trens ao longo da malha ferroviária a três grandes causadores: a quantidade de restrições de via temporárias, a quantidade de paradas e a saturação do porto.

Dentre as entradas citadas acima, a de maior impacto no problema da má distribuição de trens ao longo da malha ferroviária é a saturação do porto, ou também saturação da malha no trecho do Porto de Santos, o indicador foi previamente abordado na Tabela 2 e será melhor discutido na presente seção. Relembrando que a saturação da malha mede a capacidade operacional de uma linha, pode-se dizer que o trecho do Porto de Santos possui uma quantidade de trens ideal, ou seja, o valor que ela suporta levando em conta a capacidade, tanto em questões de Tonelada Útil (TU) - somente o peso da carga - para manter o Porto abastecido e em questões de Tonelada por Quilômetro Bruto (TKB) - peso da carga somado ao peso dos ativos - que a via permanente aguarde sem que ocorram avarias a mesma.

A saturação do porto impacta toda a malha ferroviária. Quando a saturação está baixa, é necessário ajustar o ritmo dos trens para garantir que o porto não fique desabastecido. Por outro lado, quando a saturação está alta, é o momento de cadenciar os trens para evitar sobrecarga e manter o fluxo de operações eficiente. A saturação da malha é medida como sendo a porcentagem da quantidade que existe na malha no momento, ou seja a quantidade real, e o que deveria existir, ou seja a quantidade ideal.

A segunda entrada de maior relevância no problema é a quantidade de restrições de velocidade de via. Restrições de velocidade tratam-se de limitações por um período da Velocidade Máxima Autorizada (VMA) do trecho. Elas são impostas durante obras de expansão, obras de manutenção, implementações de novas tecnologias na via, etc. Quando há a inserção de uma restrição de velocidade no sistema, essa passa a ser a VMA do trecho pelo período em que permanecer ativa.

Dessa forma, tem-se o impacto das restrições de velocidade, quanto mais restrições de velocidade um trecho possuir, maior será o impacto no seu tempo de condução, ou seja, mais distante ele ficará das metas propostas pela organização. E quanto menos restrições um trecho possuir, mais o tempo de condução se desempenhará próximo as metas propostas pela companhia para o tempo de condução.

A terceira entrada que impacta de forma ativa no problema é a quantidade média de paradas de um trem durante o percurso de um trecho. Ao longo de um trecho um trem pode parar por diversos motivos: paradas por anomalias, ou seja, tudo que não estava previsto no percurso, paradas por propagação, que são paradas que ocorrem em decorrência de paradas a frente, paradas por cruzamentos, que ocorrem nas linhas singelas - linhas que só circulam um trem por vez - as paradas por obras de via ou por trocas de maquinista a cada fim de jornada.

A quantidade de paradas interfere diretamente no Tempo de Trânsito, pois além de aumentar o THP, aumenta o Tempo de Condução e faz a companhia perder em termos de uso do TO. Em cada parada o maquinista responsável pela composição deve assumir o controle manual do trem, devido as velocidades de operação do TO, que não opera em velocidades abaixo de 18 km/h. A não utilização do TO leva a não utilização do MTO,

o que torna imparcial o uso de modulações para a diminuição no Tempo de Condução; ademais, a cada parada do trem, leva-se um tempo no processo de aceleração até a velocidade em que o TO consegue operar, que pode variar para mais ou menos dependendo do peso e desenho do trem e do local em que ocorreu a parada.

A Tabela 3 resume e compila, as três entradas do Sistema *Fuzzy*, com uma breve descrição, os impactos e como é o método de aferição.

Tabela 3 – Especificação das Entradas do Sistema *Fuzzy*.

Indicador	Descrição	Impacto no Problema	Método de Aferição
Saturação da Malha no Porto ($\%Sat$)	Cada trecho possui uma quantidade de trens ideal para a circulação, podendo estar saturada ou com faixas livres.	Tanto uma saturação elevada quanto baixa indicam um fluxo de trens desbalanceado. Ter um porto saturado é indicativo de cadenciar os trens posteriores, e ter um porto não saturado é indicativo de dar ritmo aos trens posteriores.	$\% Sat = \left(\frac{\text{Quant. Real}}{\text{Quant. Ideal}} \right)$
Quantidade de Restrições de Velocidade (RV)	É todo o tempo em que houve movimento do trem, ou seja, que a velocidade foi diferente de zero.	Quanto mais restrições de velocidade, mais distante do Tempo de Condução uma composição estará.	Contagem das restrições de velocidade imputadas no sistema da ferrovia no dia para o respectivo trecho.
Média de Paradas (\bar{P})	O número de paradas contabiliza a quantidade média de paradas que um trem possui ao longo do trecho. Podendo ser paradas programadas ou não programadas.	Um número elevado de paradas é indicativo de aumento no Tempo de Condução e um baixo número de paradas é indicativo de melhora no Tempo de Condução.	$\bar{P} = \left(\frac{\text{Soma de Paradas}}{\text{Total de Trens}} \right)$

4.3 Definição da Saída

O sistema *fuzzy*, assim como suas entradas, é profundamente influenciado pelas saídas que produz. A saída do sistema é a resposta final que resulta da combinação e processamento das entradas, e é essencial para a tomada de decisões e ajustes operacionais. Neste capítulo, será abordada a definição da única saída do sistema *fuzzy* proposto. A saída do sistema *Fuzzy* será o melhor ponto de MTO, ou seja, o sistema dará uma opção de otimização, que mediante ao cenário do dia de saturação do porto, restrições de via e quantidade de paradas indique se os trens devem se deslocar mais rápido ou mais lentamente, afim de entregar o resultado de Tempo de Condução e, conseqüentemente, Tempo de Trânsito para a companhia, mantendo um fluxo de trens balanceado.

Como mencionado anteriormente na Seção 2.3, o MTO adiciona uma porcentagem ao tempo de operação base inicialmente proposto pelo planejador de viagens do TO, também conhecido como MTO 0.5 (modo velocidade). Com a ferramenta, espera-se explorar mais pontos do MTO, não apenas os modos velocidade e economia, o que, sobretudo, geraria impactos sobre o consumo de diesel.

A Tabela 1, citada na Seção 2.3, mostra os impactos da escolha do MTO. Sendo assim, quanto menor a porcentagem, menor será o tempo de condução e quanto maior a porcentagem maior será o tempo de condução. Essa variante, colaborará com o ajuste do fluxo de trens ao longo da malha ferroviária.

4.4 Definição das Funções de Pertinência e Universos de Discurso

Para determinar os universos de discurso para cada uma das entradas e suas respectivas funções de pertinência, foram realizadas análises estatísticas baseadas em dados históricos e pseudonomizados fornecidos pela empresa Rumo Logística.

Primeiramente, como o trecho da Rumo Logística é dividido em 6 trechos, é importante escolher um trecho para o estudo, eles podem variar na quantidade de trens, paradas e restrições. Entretanto o método para a decisão dos universos de discurso e funções de pertinência se adequam para qualquer um. Sendo assim, o trecho escolhido foi o Trecho 2, que compreende o trajeto da cidade de Araraquara a Campinas. A escolha do trecho 2 se deu pela alta utilização do TO, baixa utilização dos outros pontos do MTO, ou seja, pouca modulação de velocidade e uma base de dados histórica que pode comprovar a efetividade do Sistema *Fuzzy* proposto.

Para as entradas "Média de Paradas" e "Quantidade de Restrições", o método de análise utilizado para quantificar os valores limitantes de cada grupo, classificados como "pouco", "intermediário" e "muito", foi o método dos quartis.

O método dos quartis é uma técnica estatística que divide um conjunto de dados em quatro partes iguais, cada uma contendo 25% dos dados ordenados. Os quartis ajudam a entender a distribuição dos dados, identificando a tendência central, a dispersão e possíveis outliers. Como vantagens da utilização do método de quartis, tem-se: uma forma natural de dividir dados em categorias, uma técnica de fácil implementação e alta flexibilidade.

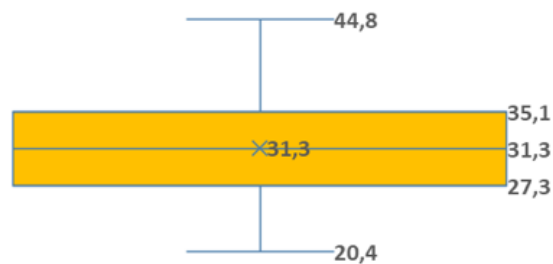
Tanto para a entrada "Média de Paradas" quanto para a "Quantidade de Restrições", a definição dos pontos máximos e mínimos de cada grupo de variáveis linguísticas foi baseada no conhecimento dos especialistas ferroviários, em uma base histórica de um ano (dados diários) e nas metas estabelecidas pela ferrovia. A análise com o método dos quartis foi validada pela aderência dos resultados às metas da companhia para Tempo de Condução, indicador base que mede a efetividade do projeto, e que quanto menor significa

que os trens estão parando menos e andando mais rápido, ou seja com menos restrições de velocidade.

Se os valores classificados como "pouco" resultarem em um Tempo de Condução dentro do esperado, isso indica que a análise por quartis foi precisa. Da mesma forma, se os valores na categoria "intermediário" estiverem levemente fora do esperado, e os valores na categoria "muito" se distanciarem consideravelmente da meta, isso reforça a eficácia do método dos quartis, demonstrando sua capacidade de categorizar os dados de acordo com o desempenho operacional desejado.

Dessa forma, para as funções de pertinência para a entrada de "Média de Paradas" foram coletados dados de janeiro de 2023 a agosto de 2024 do Trecho 2. O gráfico em quartis pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6 – Paradas por Trem.
Média de Paradas por Trem por dia no Trecho 2

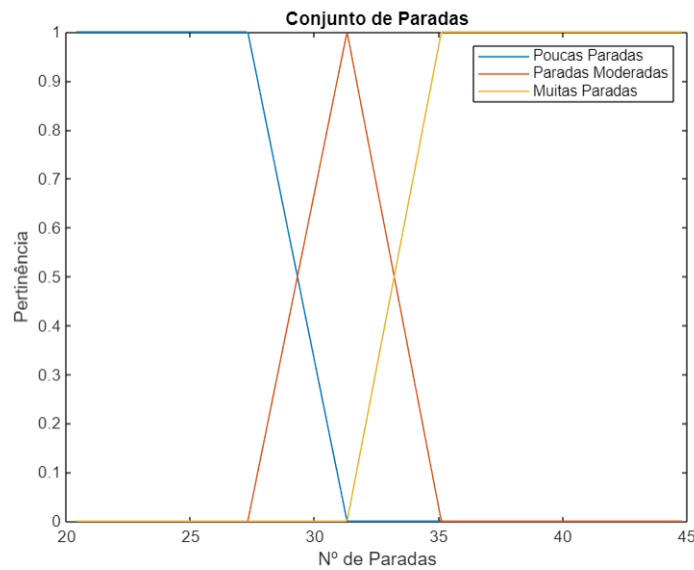


Fonte: Autoria Própria.

O gráfico de quartis tipo "Boxplot", mostrado na Figura 6, revela a distribuição das médias de paradas por trem entre janeiro de 2023 e agosto de 2024 no trecho 2. Observa-se que a menor média registrada foi de 20,4 paradas e a maior de 44,8 paradas, delimitando assim o universo de discurso.

No primeiro quartil, que vai de 20,4 a 27,3 paradas, concentram-se 25% dos dados analisados. Essa faixa é associada a bons desempenhos no Tempo de Condução, indicando que menos paradas contribuem para uma operação mais eficiente. O segundo quartil, que vai de 27,3 a 31,3 paradas, representa um ponto intermediário onde o desempenho começa a variar, sugerindo que nessa faixa as paradas ainda são controláveis, e podem gerar um leve impacto no Tempo de Condução. Por fim, os valores acima de 31,3 paradas até o máximo de 44,8 paradas, cobrindo o terceiro e quarto quartis, indicam um aumento significativo no número de paradas. Isso frequentemente resulta em desvios maiores no Tempo de Condução. Dessa forma, o gráfico com as funções de pertinência para os conjuntos linguísticos de paradas pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Funções de Pertinência de Paradas média.



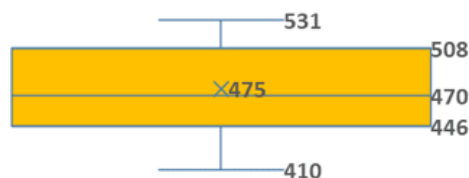
Fonte: Autoria Própria.

A funções de pertinência para os conjunto de paradas se deram pelos formatos: trapezoidal para poucas paradas, devido a necessidade de representar um intervalo de valores onde a operação é considerada eficiente, com pertinência 1; triangular para paradas moderadas pois representa uma rápida zona de transição; e trapezoidal para muitas paradas por representar um intervalo de valores onde a operação é considerada ineficiente, com pertinência 1.

Para a entrada de quantidade de Restrições, foi realizada a mesma análise, extraindo dados de janeiro de 2023 a agosto de 2024 para as restrições ativas no trecho 2. O "Boxplot" pode ser visualizado na Figura 8.

Figura 8 – Quantidade de Restrições Ativas.

Quantidade de Restrições ativas por dia no Trecho 2



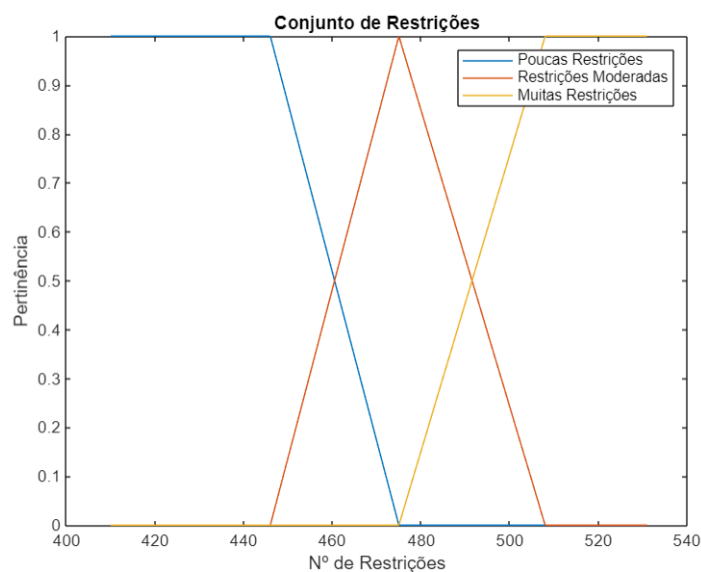
Fonte: Autoria Própria.

Com o gráfico observa-se que a menor quantidade de restrições registradas em um dia foi 410 e a maior quantidade foi de 531, valores que demilitaram o universo de discurso.

No primeiro quartil, que vai de 410 a 446 restrições, concentram-se 25% dos dados analisados. Essa faixa é associada a bons desempenhos no Tempo de Condução, indicando que com menos restrições um trem consegue entregar uma operação mais próxima a VMA,

entregando um resultado de Tempo de Condução dentro das premissas da companhia. O segundo quartil, que vai de 446 a 475 restrições, representa um ponto intermediário onde o desempenho começa a variar, sugerindo que nessa faixa a quantidade de restrições ainda são controláveis, e podem causar impactos no Tempo de Condução. Por fim, os valores acima de 508 paradas até o máximo de 531 restrições, cobrindo o terceiro e quarto quartis, indicam um aumento significativo no número de restrições. Isso frequentemente resulta em desvios maiores no Tempo de Condução devido ao distanciamento da VMA. Dessa forma, o gráfico com as funções de pertinência para os conjuntos linguísticos de quantidade de restrições pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Funções de Pertinência de Quantidade de Restrições.



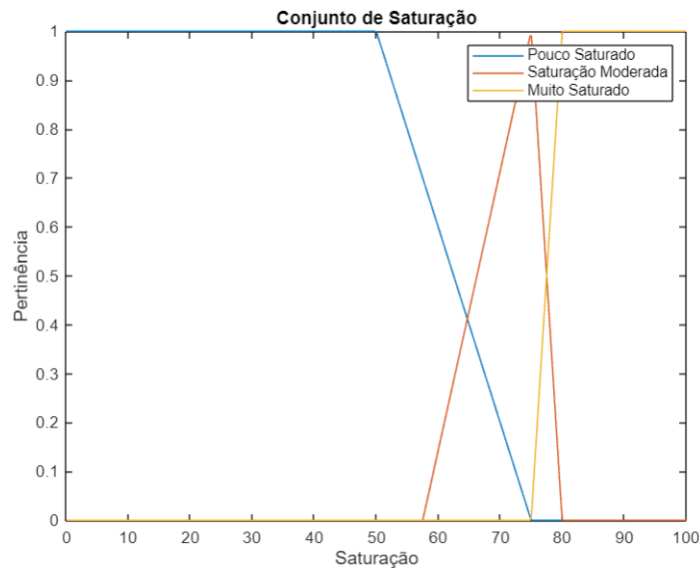
Fonte: Autoria Própria.

As funções de pertinência para o conjunto de restrições se deram pelos formatos: trapezoidal para poucas restrições, devido à necessidade de representar um intervalo de valores onde a operação é considerada eficiente, com pertinência 1; triangular para paradas moderadas pois representa uma zona de transição; e trapezoidal para muitas paradas por representar um intervalo de valores onde a operação é considerada ineficiente, com pertinência 1.

A última e mais importante entrada é a saturação do porto. A decisão de considerar a saturação do Porto de Santos como um problema crítico foi feita por especialistas devido à complexidade e à natureza sensível da operação portuária. A saturação é uma questão delicada porque, ao se aproximar de um alto nível de utilização, como 75%, o porto se torna extremamente vulnerável a fatores externos imprevistos, como condições climáticas adversas. Por exemplo, uma chuva intensa pode rapidamente causar um efeito cascata, resultando em filas de navios, atrasos no carregamento e descarregamento, e um aumento dos custos operacionais. Isso ocorre porque o sistema já está operando próximo de sua capacidade máxima, sem margem para acomodar interrupções.

Portanto, o entendimento dos especialistas é que a saturação não é apenas uma questão de volume de carga, mas também de capacidade de resposta a eventos inesperados, onde a linha entre a eficiência e o caos é muito tênue. Por esse motivo, a partir de 75% o cenário já começa ser de alta saturação. As funções de pertinência para saturação podem ser vistas na Figura 10.

Figura 10 – Funções de Pertinência para Saturação do Porto.

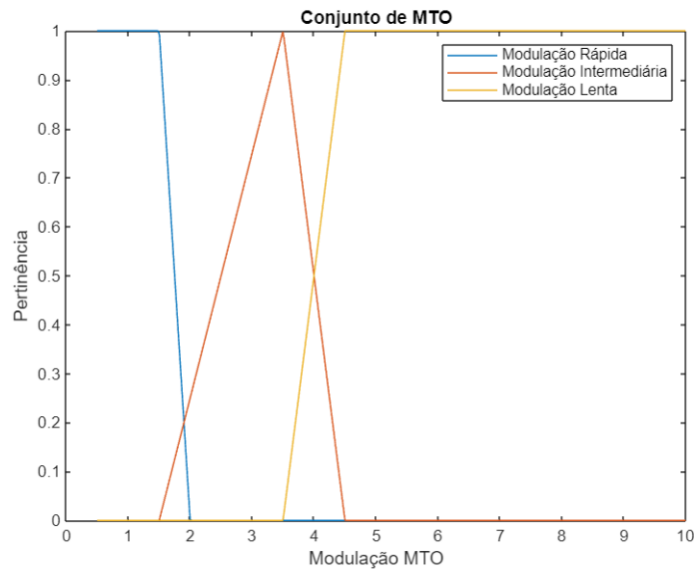


Fonte: Autoria Própria.

O universo de discurso vai de 0% a 100%. Para um porto com baixa saturação, foi utilizada uma função trapezoidal, com pertinência 1 entre 0% e 50%, ou seja, representa a necessidade de trens no porto, dessa maneira os trens nos trechos anteriores deverão dar ritmo, objetivando manter o porto abastecido. Para um porto com saturação intermediária, nem pouco saturado e nem muito saturado, ou seja, que possui capacidade para mais trens e em contrapartida deve se ater a possíveis lotações, foi utilizada uma função triangular, com rápidas descidas e subidas. E para um cenário muito saturado, foi utilizado uma função trapezoidal a partir de 75% com pertinência 1 entre 80% e 100%, sinônimo de um porto saturado, dessa forma os trens de trechos anteriores devem iniciar um processo de cadenciamento, ou também conhecido como aumento no tempo de condução.

Para única saída que o sistema possui a tomada de decisão para o universo de discurso que vai de 0,5 a 10 foi tomada pela sensibilidade que poucos minutos podem fazer um tempo de condução sair ou não do resultado esperado. E as funções de pertinências podem ser vistas na Figura 11, foram divididas em trapezoidal para modulação rápida, com pertinência 1 de 0,5 a 1,5; triangular para a modulação intermediária, e trapezoidal para a modulação lenta, com pertinência 1 entre 4,5 e 10. Dessa forma os trens operarão com menor tempo de condução entre os pontos 0,5 e 2 do MTO e com maior tempo de condução entre os pontos 4 e 10.

Figura 11 – Funções de Pertinência para o MTO.



Fonte: Autoria Própria.

4.5 Definição da Base de Regras

A base de regras do sistema *Fuzzy* foi elaborada a partir da integração do conhecimento especializado de profissionais ferroviários com dados históricos. Os especialistas, com anos de experiência no setor, forneceram *insights* valiosos sobre os padrões e comportamentos esperados nos sistemas ferroviários. Esses conhecimentos, que muitas vezes são qualitativos e baseados na intuição prática adquirida ao longo do tempo, foram formalizados em uma base de regras *Fuzzy* que capturam o processo de decisão, que atualmente é feito de forma manual. Paralelamente, os dados históricos desempenharam um papel crucial ao validar essas percepções e ao fornecer uma base quantitativa que confirma e complementa o conhecimento dos especialistas.

Portanto, como o sistema possui três entradas, cada uma com três conjuntos linguísticos, e uma única saída, a base de regras foi construída a partir de uma tabela com 27 combinações possíveis. Essa base de regras pode ser visualizada na Tabela 4.

Na Tabela 4, a saída representada por MR representa a modulação rápida, MI modulação intermediária e ML modulação lenta.

4.6 Implicação

O método de implicação utilizado para o sistema *Fuzzy* será o método de Mamdani. O método de implicação de Mamdani é uma técnica amplamente utilizada em sistemas fuzzy para a inferência a partir da associação de entradas fuzzyficadas com saídas por meio de regras do tipo "*Se... Então*", como explicado na Seção 3.

		Saturação do Porto		
Quantidade de Restrições	Média de Paradas por Trem	Pouca Saturação	Saturação Moderada	Muita Saturação
Poucas Restrições	Poucas Paradas	MR	MI	ML
	Paradas Moderadas	MR	MI	ML
	Muitas Paradas	MR	MI	ML
Restrições Moderadas	Poucas Paradas	MR	MI	MI
	Paradas Moderadas	MR	MR	MI
	Muitas Paradas	MR	MR	MI
Muitas Restrições	Poucas Paradas	MR	MR	MI
	Paradas Moderadas	MR	MR	MI
	Muitas Paradas	MR	MR	MR

Tabela 4 – Base de Regras para o Sistema de Gerenciamento do Fluxo de Trens

No presente projeto, foram utilizadas 27 regras baseadas no operador lógico "E", que seleciona o menor valor de pertinência entre as combinações de conjuntos *Fuzzy*. As saídas das regras foram estruturadas seguindo uma ordem de relevância das entradas, priorizando aquelas que têm maior impacto no problema. A entrada mais significativa é a saturação do porto, pois ela determina a necessidade ou não de trens. Em seguida, considera-se a quantidade de restrições, que influencia a velocidade com que o trem chega ao porto, podendo ser mais rápida ou mais lenta. Por fim, a quantidade média de paradas também afeta o problema, pois reduz a velocidade do trem. No entanto, essa última variável não é controlada diretamente pelo MTO, que atua apenas no movimento do trem. Segue

alguns exemplos da implicação das regras através do método de Mamdani e uma breve explicação sobre as escolhas:

- ❑ Se é pouca saturação, poucas restrições e poucas paradas então a modulação é rápida: Em um cenário de baixa saturação é emergencial manter um porto abastecido, por esse motivo os trens deverão ser ritmados a ponto de garantir tal cenário, considera-se de baixa saturação, com urgência de recebimento de trens, valores entre 0 e 50%.
- ❑ Se é saturação moderada, restrições moderadas e paradas moderadas então é modulação rápida: Nesse caso, o cenário ainda não se encontra saturado e possui uma certa quantidade de restrições e paradas, dessa forma mesmo com um MTO rápido que faça o tempo de condução ser menor, o trem ainda levará um tempo maior devido a existência de restrições e paradas moderadas.
- ❑ Se saturação é alta, muitas restrições e muitas paradas então modulação é intermediária: Nesse cenário, não se pode dar ritmo aos trens, pois irá ocorrer a formação de filas. Em contrapartida, colocar no modo lento poderá levar a um cenário de porto desabastecido

4.7 Método de Defuzzyficação

O método de defuzzificação por Centro de Área (CDA) foi escolhido para este trabalho por ser amplamente reconhecido como uma das técnicas mais precisas e robustas na conversão de um conjunto de valores fuzzy em um valor preciso. O método do Centro de Área calcula o ponto de equilíbrio de uma forma fuzzy, levando em conta tanto a amplitude quanto a distribuição dos valores de pertinência. Isso resulta em uma defuzzificação que representa melhor a média ponderada dos conjuntos fuzzy envolvidos, o que é particularmente útil em sistemas de controle que exigem precisão e estabilidade. Segundo (JANG et al., 1998), o método de defuzzificação por centroide é preferido em muitas aplicações por seu balanço adequado entre precisão e simplicidade computacional. Além disso, outros métodos, como o MPM ou MDM, podem falhar em capturar a distribuição completa da saída fuzzy, especialmente quando há mais de um pico significativo, Ross (2005). Portanto, o método de Centro de Área oferece uma melhor representação do resultado inferido, justificando sua escolha neste trabalho.

4.8 Pós Processamento

A princípio, os módulos do MTO podem ser utilizados de 0.5 a 10, podendo existir valores decimais; entretanto, usualmente, utiliza-se número inteiros. Por esse motivo, os valores de MTO serão aproximados ao inteiro mais próximo.

4.9 Implementação

A implementação deste trabalho foi realizada por meio de códigos, cada um responsável por uma etapa do sistema *Fuzzy*. Existem códigos específicos para as funções trapezoidal e triangular, que foram responsáveis pela fuzzificação dos valores de entrada, os quais estão detalhados no Apêndice A. Também há um código dedicado ao processo de ativação, no qual as regras da base de regras são ativadas, visualizado no Apêndice C. O código de inferência, que lida com a ativação das regras e a delimitação do grau de pertinência a partir da combinação dos conjuntos, pode ser visto no Apêndice B; seguido pelo código de agregação, que agrega as regras ativadas e gera a região *Fuzzy* correspondente, visto no Apêndice D. Em seguida, o código de defuzzificação transforma os valores qualitativos em quantitativos, visto no Apêndice E. E, por fim, há um código principal (main) que serve como ponto de partida para a execução do programa, visto no Apêndice F.

Capítulo 5

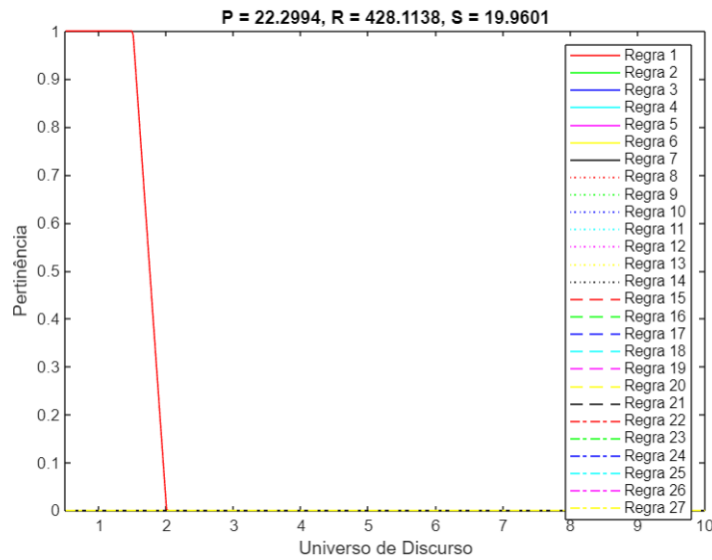
Resultados e Discussões

Primeiramente, nesta seção, será apresentada a funcionalidade do sistema fuzzy desenvolvido, demonstrando os resultados obtidos a partir da análise dos valores de pertinência máxima (1) em cada um dos três grupos linguísticos da única variável de saída. Esses grupos representam as categorias "Modulação Rápida", "Modulação Intermediária" e "Modulação Lenta", que foram definidos com base em um tempo de condução pseudonimizado de 18 horas, que é o resultado esperado pela companhia.

A análise considerará diferentes combinações de entradas baseadas em cenários históricos. A análise será realizada utilizando variáveis de entrada: quantidade de restrições, a quantidade média de paradas por trem e o cenário de saturação do porto no momento. O objetivo é correlacionar esses valores com o MTO utilizado pela companhia na época e verificar se os resultados gerados pelo sistema *Fuzzy* proposto são melhores ou, pelo menos, semelhantes ao que foi aplicado na prática. Dessa forma, buscamos comprovar a eficácia do sistema fuzzy na oferta de soluções que correspondam ou superem as decisões históricas, demonstrando seu potencial na melhoria da tomada de decisões.

Para a primeira análise, foi utilizado um cenário arbitrário, no qual o cenário possuía uma saturação de 20%, ou seja baixa, o porto necessitava de trens, a quantidade de restrições para o Trecho 2 eram de 428 e a quantidade de paradas média era de 22,3 por trem. Todas as variáveis possuem o grau de pertinência 1 para os conjuntos linguísticos mais baixas de cada entrada, como poucas restrições, poucas paradas e baixa saturação, o que fez com que uma única regra, a regra 1, para uma modulação rápida, fosse ativada, como é possível verificar na Figura 12.

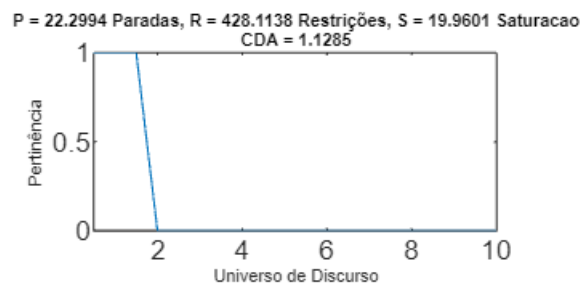
Figura 12 – Ativação das Regras para $P = 22,3$ $R = 428$ restrições e $S = 20\%$ de saturação.



Fonte: Autoria Própria.

No dia analisado acima, o MTO utilizado foi o de 0.5 e retornou um Tempo de Condução de 17,3 horas. O sistema *Fuzzy* proposto, com as variáveis impostas retornou um MTO de 1,1285, ou 1 quando arredondado, para o menor valor inteiro, como é possível observar na Figura 13.

Figura 13 – Agregação das Regras para $P = 22,3$ $R = 428$ restrições e $S = 20\%$ de saturação.



Fonte: Autoria Própria.

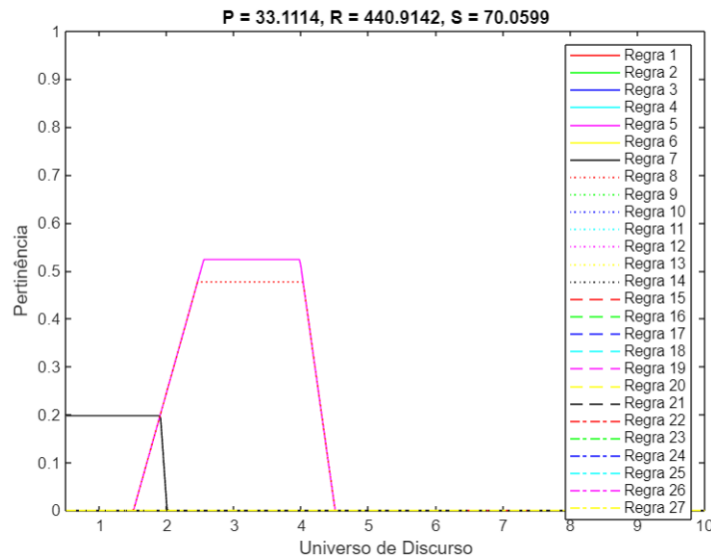
Sendo assim, mesmo com o MTO maior, ou seja, que acrescentou 1% ao tempo de condução traçado pelo TO o sistema garantiu que o o resultado fosse o almejado pela companhia.

$$17,3 h + 1\% \text{ de } 17,3 h = 17,5 h$$

Para o segunda análise, tem-se um dia no qual as condições eram de 33,1 paradas por trem, 441 restrições no Trecho 2 e uma saturação do porto de 70%. 33,1 é um valor que pertence tanto ao grupo de paradas moderadas, quanto ao grupo de muitas paradas. 443 restrições pertence ao grupo de poucas restrições e 70% de saturação pertence tanto ao

grupo de pouca saturação quanto ao grupo de saturação moderada. Dessa forma 4 regras foram ativadas, as regras 4,5,7 e 8, como é possível verificar na Figura 14

Figura 14 – Ativação das Regras para P = 33,1 R = 441 e S = 70% de saturação.



Fonte: Autoria Própria.

No dia analisado o MTO utilizado foi o 10 e retornou um tempo de condução de 18,57 horas, bem fora do esperado pela companhia, que possui uma meta de 18h. O MTO gerado pelo sistema *Fuzzy* foi de 2,7713, arredondando para o inteiro mais próximo 3, como é possível visualizar na Figura 15.

Figura 15 – Agregação das Regras para P = 33,1 R = 441 e S = 70% de saturação.



Fonte: Autoria Própria.

Dentro dessas condições o MTO pelo sistema *Fuzzy* se mostrou mais eficiente, visto que, caso fosse utilizado, retornaria um tempo de condução de aproximadamente, 17,4h , o que está dentro do proposto pela companhia. Primeiramente, para calcular a estimativa do tempo de condução foi necessário achar o tempo base programado pelo TO:

$$Xh + 10\% \text{ de } Xh = 18,57 h$$

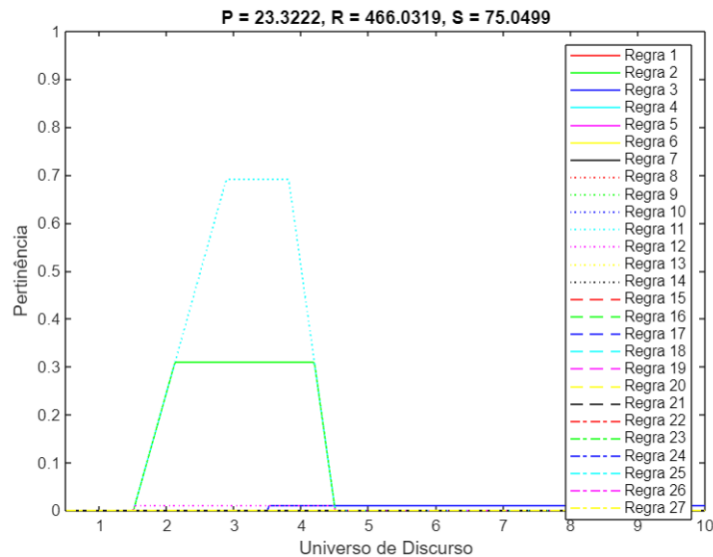
$$X = 16,9h$$

Na sequência, aplica-se o o MTO proposto pelo sistema ao tempo base:

$$16,9h + 3\% \text{ de } 16,9h = 17,4h$$

Para o último caso tem-se um cenário de 75% de saturação, que pode ser considerada como baixa saturação, saturação moderada e alta saturação; tem-se 466 restrições para o trecho 2, que se enquadra em baixadas e moderadas restrições e uma média de 23,3 paradas por trem, considerada como uma quantidade baixa de paradas. Portanto, foram ativadas 6 regras, da 1ª a 3ª e da 10ª a 12ª, como é possível verificar na Figura 16.

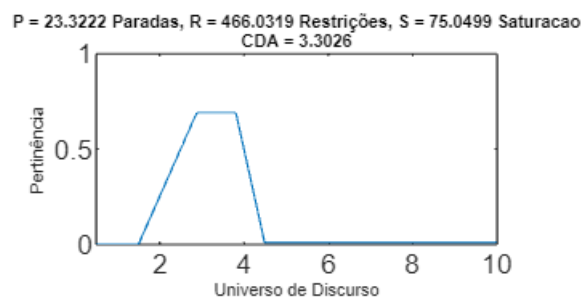
Figura 16 – Ativação das Regras para $P = 23,3$ $R = 466$ e $S = 75\%$ de saturação.



Fonte: Autoria Própria.

Para esse cenário estava sendo utilizado um MTO de 0,5, que entregou um tempo de condução de 17,4h, o tempo base. Entretanto um MTO de 3 ainda entregaria o tempo de condução dentro da meta e economizaria diesel na faixa dos 20 litros por trem, como é possível visualizar na Figura 17.

Figura 17 – Agregação das Regras para $P = 23,3$ $R = 466$ e $S = 75\%$ de saturação.



Fonte: Autoria Própria.

Um MTO de 3 entregaria um tempo de condução de, aproximadamente, 17,9h.

$$17,4h + 3\% \text{ de } 17,4h = 17,9h$$

Um resumo dos três exemplos pode ser visualizado da Tabela 5. A tabela aborda o MTO utilizado e o tempo de condução realizado em comparação com o MTO proposto pelo *Fuzzy* e uma estimativa do tempo que o MTO proposto pelo *Fuzzy* levaria.

Tabela	Paradas média por trem	Qtd Restrições	Saturação Porto	MTO utilizado	MTO Fuzzy	Tempo de Cond. Real (h)	Tempo de Cond. esperado (h)	Tempo de Cond. Fuzzy (h)
Ex 1	22,3	428	20%	0,5	1	17,3	< 18h	17,5
Ex 2	33,1	441	70%	10	3	18,57	< 18h	17,4
Ex 3	23,3	466	75%	0,5	3	17,4	< 18h	17,9

Tabela 5 – Resumo de Dados de Operação de Trens

No primeiro exemplo, foi utilizado um MTO de 0,5, que foi funcional e atendeu às expectativas da companhia. O MTO dado pelo *Fuzzy* garantiu um resultado semelhante, retornando o MTO 1. De acordo a Tabela 1, fornecida pela Wabtec, utilizar o MTO 0,5 ou 1 teria a mesma economia em Diesel.

No segundo exemplo, foi utilizado um MTO de, o qual não atendeu às expectativas da companhia, caso tivesse usado um MTO de 3, proposto pelo sistema *Fuzzy*, atenderia as expectativas.

E no último exemplo tem-se o uso de um MTO de 0,5, que também foi funcional, pois garantiu um tempo de condução abaixo de 18h, entretanto, podia ter sido usado um MTO de 3, que garantiria um resultado abaixo de 18h e teria uma economia de diesel na faixa dos 20 litros por trem.

Capítulo 6

Conclusão

Neste trabalho, foi desenvolvido e implementado um sistema de decisão baseado em algoritmos inteligentes para otimizar o gerenciamento do fluxo de trens nas ferrovias brasileiras. Através da aplicação da lógica *Fuzzy*, foi criado um modelo que visa o equilíbrio do fluxo de trens, evitando saturações nos portos e paradas desnecessárias. Os resultados demonstraram que a ferramenta é particularmente eficaz em ajustar os níveis de MTO, identificando casos onde uma modulação muito rápida poderia ser intermediária e onde uma modulação muito lenta poderia ser mais rápida, garantindo assim um fluxo mais eficiente e econômico.

A funcionalidade da ferramenta mostrou-se promissora, mas reconhece-se que há espaço para melhorias contínuas. Uma etapa futura importante será a calibração mais precisa dos dados para refinar ainda mais a precisão das previsões. Além disso, a implementação de uma interface gráfica de fácil visualização poderá facilitar a interação dos usuários com o sistema, permitindo um monitoramento mais intuitivo e em tempo real das operações ferroviárias.

Essas melhorias não apenas aumentarão a eficiência do sistema, mas também contribuirão para a sustentabilidade e a competitividade do modal ferroviário no Brasil, reforçando sua importância no transporte de cargas e na economia nacional

Referências

- AGROFY. **Quem são os maiores produtores agrícolas do mundo?** 2023. Disponível em: <<https://news.agrofy.com.br/noticia/201932/quem-sao-os-maiores-produtores-agricolas-do-mundo>>.
- ANPD. **Anonimização e Pseudonimização para Proteção de Dados Pessoais.** 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/participamaisbrasil/consulta-a-sociedade-estudo-preliminar-anonimizacao-e-pseudonimizacao-para-protecao-de-dados>>.
- ANTF. **O MEIO AMBIENTE AGRADECE.** 2023. Disponível em: <<https://www.antf.org.br/releases/o-meio-ambiente-agradece/>>.
- _____. **O setor ferroviário de Carga Brasileiro.** 2023. Disponível em: <<https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>>.
- AUTORIDADE PORTUÁRIA DO PORTO DE SANTOS. **Porto de Santos sobe uma posição no ranking mundial de portos.** 2023. Disponível em: <<https://www.portodesantos.com.br/2023/09/06/porto-de-santos-sobe-uma-posicao-no-ranking-mundial-de-portos/>>.
- BEŠINOVIĆ, N.; GOVERDE, R. M. P. Capacity assessment in railway networks. In: _____. **Handbook of Optimization in the Railway Industry.** Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 25–45. ISBN 978-3-319-72153-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72153-8_2>.
- JANG, J.-S. R. et al. Neuro-fuzzy and soft computing-a computational approach to learning and machine intelligence. **Proceedings of the IEEE**, [New York, NY]: Institute of Electrical and Electronics Engineers, [1963-, v. 86, n. 3, p. 600–603, 1998.
- JANTZEN, J. **Foundations of fuzzy control.** [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- MITCHELL, M. **An Introduction to Genetic Algorithms.** Cambridge, MA: MIT Press, 1998.
- OGATA, K. **Modern Control Engineering.** 5. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010.
- OLIVEIRA, F. L. C. **PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA REVISÃO DOS TEMPOS PADRÃO DE CICLO DE PRODUÇÃO NA OPERAÇÃO FERROVIÁRIA.** Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, 2007.

PIRES, M. C.; ZAGHENI, E. S. d. S. Sistema de indicadores de desempenho: um estudo de caso no setor ferroviário. In: **XXIX ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte**. Ouro Preto: [s.n.], 2015. Anais [...]. ANPET.

RIGNEL, D. G. de S.; CHENCI, G. P.; LUCAS, C. A. Uma introdução à lógica fuzzy. **Revista eletrônica de sistemas de informação e gestão tecnológica**, 2011.

ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2005.

RUMO LOGÍSTICA. **Regulamento Operacional**. 2020. Disponível em: <<https://rumolog.com/wp-content/uploads/2022/03/Regulamento-Operacional-RUMO.pdf>>.

_____. **Procedimento Operacional**. 2021. Procedimento interno não publicado.

_____. **Quem somos**. 2023. Disponível em: <<https://rumolog.com/quem-somos/>>.

SILVEIRA, M. R. Circulação, transportes e logística no brasil: inserção internacional, permanências e diversidades na reorganização territorial. **Revista da ANPEGE**, 2022.

TANSCHKEIT, R. Sistemas fuzzy. **Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro**, p. 338–353, 2004.

Disponível em: <<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/sumar/ensino/sistemas-fuzzy/sistemas-fuzzy/ICA-Sistemas%20Fuzzy.pdf>>.

VIANNA, G. O mito do rodoviarismo brasileiro. **São Paulo: NTC&Logística**, v. 63, p. 68, 2007.

WABTEC. **Trip Optimizer Smart Cruise Control for Trains**. 2021. Disponível em: <<https://www.wabteccorp.com/digital-intelligence/energy-management/trip-optimizer>>.

ZADEH, L. A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, SMC-3, n. 1, p. 28–44, 1973.

Apêndices

APÊNDICE A

Funções de Pertinência

```
function [ y ] = triangular(x,a,m,b)
% a e b: bases do triangulo / m: vertice do triangulo
np = length(x);
for i = 1:np
    if(x(i) < a)
        y(i) = 0; % Zero
    elseif(x(i) < m)
        y(i) = (x(i)-a)/(m-a); % Reta ascendente
    elseif(x(i) < b)
        y(i) = (b-x(i))/(b-m); % Reta descendente
    else
        y(i) = 0;
    end
end
end

function [ y ] = trapezoidal(x,a,m,n,b)
% a e b: base maior do trapezio / m e n: base menor do trapezio
np = length(x);
y = zeros(1, np);
for i = 1:np
    if x(i) < a || x(i) > b
        y(i) = 0; % Fora do intervalo
    elseif x(i) >= a && x(i) < m
```

```
y(i) = (x(i) - a) / (m - a); % Reta ascendente
elseif x(i) >= m && x(i) <= n
y(i) = 1; % Plato superior
elseif x(i) > n && x(i) < b
y(i) = (b - x(i)) / (b - n); % Reta descendente
end
end
end
```

APÊNDICE B

Inferência

```
function [saida, OUT] = inferencia3_simples(IN1, conjuntoIN1, x1, IN2,
conjuntoIN2, x2, IN3, conjuntoIN3, x3, OUT, conjuntoOUT, rulebase)
```

```
[nc1, np] = size(conjuntoIN1);
```

```
[nc2, np] = size(conjuntoIN2);
```

```
[nc3, np] = size(conjuntoIN3);
```

```
% Conjuntos ativados
```

```
[flag1, pert1] = ativacao(IN1, conjuntoIN1, x1)
```

```
[flag2, pert2] = ativacao(IN2, conjuntoIN2, x2)
```

```
[flag3, pert3] = ativacao(IN3, conjuntoIN3, x3)
```

```
saida = zeros(np, nc1, nc2, nc3); % Inicialize a matriz de saida
```

```
for i = 1:nc1
```

```
for j = 1:nc2
```

```
for w = 1:nc3
```

```
saida(:, i, j, w) = min(conjuntoOUT(rulebase(i, j, w), :), min(pert1(i),
min(pert2(j), pert3(w))));
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

APÊNDICE C

Ativação

```
function [ flag ,pert ] = ativacao( x ,conjuntos ,xi )

[nc,np] = size(conjuntos);
flag = zeros(nc,1);
pert = zeros(nc,1);
for i = 1:np
    if(x(i) == xi)
        posicao = i;
    end
end
for i = 1:nc
    if(conjuntos(i, posicao) > 0)
        flag(i,1) = 1;
        pert(i,1) = conjuntos(i, posicao);
    end
end
end
```

APÊNDICE D

Agregação

```
function [ vetor ] = agregacao( matriz )
%Agregacao dos conjuntos fuzzy
[a,b,c,d] = size(matriz);
vetor = zeros(1,a);
for i = 1:b
for j = 1:c
for k= 1:d
vetor = max(vetor , matriz (: , i , j , k) ');
end
end
end
```

APÊNDICE E

Defuzzificação

```
function [ saida ] = defuzzificacao( x,mu_x,tipo )
np = length(x);

switch tipo
case 'CDA'
% M todo do Centro de  rea  (CDA)
numerador = 0;
denominador = 0;
for i = 1:np
numerador = numerador + x(i) * mu_x(i);
denominador = denominador + mu_x(i);
end
saida = numerador / denominador;

case 'MDM'
maximo = mu_x(1);
for i = 2:np
if (mu_x(i) > maximo)
maximo = mu_x(i);
end
end
soma = 0;
M = 0;
for i = 1:np
```

```
if(mu_x(i) == maximo)
soma = soma + x(i);
M = M + 1;
end
end
saida = soma/M;

case 'MPM'
posicao = 1;
saida = x(posicao);
for i = 2:np
if(mu_x(i) > mu_x(posicao))
saida = x(i);
posicao = i;
end
end
end
end
```

APÊNDICE F

Main

```
clc , clear , close all

% Pontos de discretizacao
n = 501;
cor = [ ' r ' ; ' g ' ; ' b ' ; ' c ' ; ' m ' ; ' y ' ; ' k ' ; ...
' :r ' ; ' :g ' ; ' :b ' ; ' :c ' ; ' :m ' ; ' :y ' ; ' :k ' ; ...
'--r ' ; '--g ' ; '--b ' ; '--c ' ; '--m ' ; '--y ' ; '--k ' ; ...
'-.r ' ; '-.g ' ; '-.b ' ; '-.c ' ; '-.m ' ; '-.y ' ];

% Entrada - Paradas
% Universo de discurso
Px = linspace(20.4, 44.8, n+1);

Tbaixa = trapezoidal(Px, 20.4, 20.4, 27.3, 31.3);
Mmedia = triangular(Px, 27.3, 31.3, 35.1);
Malta = trapezoidal(Px, 31.3, 35.1, 44.8, 44.8);
conjuntoParadas = [Tbaixa; Mmedia; Malta];
figure(1)
plot(Px, Tbaixa, Px, Mmedia, Px, Malta)
title('Conjunto de Paradas')
xlabel('N de Paradas')
ylabel('Pertinencia')
legend('Poucas Paradas', 'Paradas Moderadas', 'Muitas Paradas')
```

```
% Entrada – Restricoes
% Universo de discurso
Rx = linspace(410, 531, n+1);

Rpequeno = trapezoidal(Rx, 410, 410, 446, 475);
Rmedio = triangular(Rx, 446, 475, 508);
Rgrande = trapezoidal(Rx, 475, 508, 531, 531);
conjuntoRestricoes = [Rpequeno; Rmedio; Rgrande];
figure(2)
plot(Rx, Rpequeno, Rx, Rmedio, Rx, Rgrande)
title('Conjunto de Restricoes ')
xlabel('N de Restricoes ')
ylabel('Pertinencia ')
legend('Poucas Restricoes ', 'Restricoes Moderadas', 'Muitas Restricoes ')

% Entrada – Saturacao
% Universo de discurso
Sx = linspace(0, 100, n+1);

Spequeno = trapezoidal(Sx, 0, 0, 50, 75);
Smedio = triangular(Sx, 57.5, 75, 80);
Sgrande = trapezoidal(Sx, 75, 80, 100, 100);
conjuntoSaturacoes = [Spequeno; Smedio; Sgrande];
figure(3)
plot(Sx, Spequeno, Sx, Smedio, Sx, Sgrande)
title('Conjunto de Saturacao ')
xlabel('Saturacao ')
ylabel('Pertinencia ')
legend('Pouco Saturado ', 'Saturacao Moderada', 'Muito Saturado ')

% Saida – MIO
% Universo de discurso
Mx = linspace(0.5, 10, n+1);

Mbaixa = trapezoidal(Mx, 0.5, 0.5, 1.5, 2);
Mmedia = triangular(Mx, 1.5, 3.5, 4.5);
Malta = trapezoidal(Mx, 3.5, 4.5, 10, 10);
conjuntoMTO = [Mbaixa; Mmedia; Malta];
figure(4)
```

```
plot(Mx, Mbaixa, Mx, Mmedia, Mx, Malta)
title('Conjunto de MTO')
xlabel('Modulacao MTO')
ylabel('Pertinencia ')
legend('Modulacao Rapida', 'Modulacao Intermediaria', 'Modulacao Lenta')

% Base de Regras
rulebase(:, :, 1) =
[1 2 3;
1 2 3;
1 2 2];
rulebase(:, :, 2) =
[1 2 2;
1 1 2;
1 1 2];
rulebase(:, :, 3) =
[1 1 2;
1 1 1;
1 1 1];

% Diferentes entradas
Saturacoes = [10 75 20 70 75];
Restricoes = [423 466 428 441 443];
Paradas = [20.5 23.3 22.3 33.1 30.7];

nt = length(Saturacoes);

for i = 1:nt
clear saida saida_vetor
Sat = discretizar(Saturacoes(i), Sx);
Restri = discretizar(Restricoes(i), Rx);
Parad = discretizar(Paradas(i), Px);

% Verificar os valores discretizados
disp(['Iteracao: ', num2str(i)])
disp(['Sat: ', num2str(Sat)])
disp(['Restri: ', num2str(Restri)])
disp(['Parad: ', num2str(Parad)])
```

```

[saida , xOUT] = inferencia2_simples(Px, conjuntoParadas , Parad ,
Sx, conjuntoSaturacoes , Sat , Rx, conjuntoRestricoes , Restri ,
Mx, conjuntoMTO, rulebase);

% Figura para o grafico de inferencia fuzzy com regras
figure(i + 4)
subplot('Position' , [0.1 0.1 0.8 0.8])
hold on
mn = 0;
for j = 1:3
for w = 1:3
for k = 1:3
mn = mn + 1
plot(xOUT, saida(:, w, k, j)', cor(mn,:))
xlabel('Universo de Discurso')
ylabel('Pertinencia')
ylim([0 1])
xlim([min(Mx) max(Mx)])
title(['P = ', num2str(Parad), ', R = ', num2str(Restri), ',
S = ', num2str(Sat)])
box on
end
end
end
legend('Regra 1', 'Regra 2', 'Regra 3', 'Regra 4', 'Regra 5', 'Regra 6',
'Regra 7', 'Regra 8', 'Regra 9', 'Regra 10', 'Regra 11', 'Regra 12',
'Regra 13', 'Regra 14', 'Regra 15', 'Regra 16', 'Regra 17', 'Regra 18',
'Regra 19', 'Regra 20', 'Regra 21', 'Regra 22', 'Regra 23', 'Regra 24',
'Regra 25', 'Regra 26', 'Regra 27')
saida_vetor = agregacao(saida);
saida_dfuzzy1(i) = defuzzificacao(xOUT, saida_vetor , 'CDA');

% Figura para a agregacao e defuzzificacao
figure(10 + i)
subplot(3, 2, i)
hold on
plot(xOUT, saida_vetor)
xlabel('Universo de Discurso', 'FontSize', 5)

```

```
ylabel('Pertinencia', 'FontSize', 5)
ylim([0 1])
xlim([min(Mx) max(Mx)])
title({'P = ', num2str(Parad), ' Paradas, R = ', num2str(Restri),
'Restricoes, S = ', num2str(Sat), ' Saturacao'},
['CDA = ', num2str(saida_dfuzzy1(i))], 'FontSize', 5)
box on
end
```