ESTIMATIVA DO HORÁRIO DE CHEGADA EM TRANSPORTE PÚBLICO SOB INDISPONIBILIDADE DE POSICIONAMENTO CONTÍNUO: DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UMA ARQUITETURA INTEGRADA DE LÓGICA FUZZY E REDE DE AGENTES

Pedro Barbosa de Souza – Universidade Federal da Grande Dourados - FACET
pedro.souza066@academico.ufgd.edu.br

Alexandre Augusto Angelo de Souza – Universidade Federal da Grande Dourados - FACET
alexandreasouza@ufgd.edu.br

RESUMO

Este trabalho descreve e valida uma arquitetura computacional para estimar o horário de chegada de veículos de transporte público sem posicionamento contínuo por GPS, integrando um motor de inferência fuzzy do tipo Mamdani, que combina chuva, trânsito, tipo de via e velocidade, a uma rede de agentes que representa pontos de parada consecutivos e troca mensagens com estimativas de atraso, confiança e horários. Cada agente avalia, por inferência fuzzy própria, o contexto do trecho sob sua responsabilidade e combina essa leitura local com o valor herdado do agente anterior por média ponderada pela confiança de cada fonte, sobre variáveis linguísticas particionadas em termos extremos trapezoidais e intermediários triangulares. A arquitetura foi demonstrada sobre uma rota ilustrativa de oito pontos de parada, executada com a base de regras de produção, de cinquenta e nove regras em dez grupos, que produziu atrasos combinados entre -1,31 e 0,79 minuto, com confiança combinada entre 0,42 e 1,00. O atraso combinado atinge seu máximo um trecho após o de maior severidade ambiental, efeito da inércia da fusão por confiança, e a confiança oscila conforme a proximidade de cada contexto aos extremos saturados ou às regiões de transição da partição fuzzy. Os resultados indicam que a arquitetura estima de forma coerente e reprodutível o atraso a partir de evidências indiretas do ambiente, ainda que a ponderação por confiança permaneça um ponto a recalibrar.

Palavras-chave: Lógica Fuzzy; Sistemas Multiagente; Transporte Público; Estimativa de Atraso; Troca de Mensagens entre Agentes.

ABSTRACT

This paper describes and validates a computational architecture to estimate public transport vehicle arrival time without continuous GPS positioning, integrating a Mamdani type fuzzy inference engine, which combines rainfall, traffic, road type and speed, with a network of agents representing consecutive bus stops that exchange messages carrying delay estimates, confidence and schedule times. Each agent evaluates, through its own fuzzy inference, the context of the segment under its responsibility, and combines that local reading with the value inherited from the previous agent through a confidence weighted average, over linguistic variables partitioned into trapezoidal extreme terms and triangular intermediate terms. The architecture was demonstrated on an illustrative route of eight bus stops, run with the production rule base, of fifty nine rules across ten groups, which produced combined delays between -1.31 and 0.79 minutes, with combined confidence between 0.42 and 1.00. The combined delay reaches its maximum one segment after the one of greatest environmental severity, an effect of the inertia of the confidence fusion, and confidence oscillates according to how close each context lies to the saturated extremes or to the transition regions of the fuzzy partition. The results indicate that the architecture estimates delay in a coherent and reproducible way from indirect environmental evidence, even though the confidence weighting remains a point to recalibrate.

Keywords: Fuzzy Logic; Multi-Agent Systems; Public Transport; Delay Estimation; Inter-Agent Message Passing.

Introdução

A disponibilização de informação confiável sobre o comportamento do transporte público depende, na maior parte dos sistemas hoje em operação, de fluxos contínuos de posicionamento por GPS (Global Positioning System, sistema de posicionamento global), capturados por unidades de localização veicular automática e utilizados tanto para o rastreamento em tempo real quanto para a alimentação de modelos preditivos de chegada. Singh e Kumar (2022) revisam de forma abrangente os métodos de inteligência artificial aplicados à previsão do horário de chegada de ônibus e observam que a ampla maioria desses métodos, sejam eles estatísticos, baseados em aprendizado de máquina ou híbridos, pressupõe justamente a existência de um fluxo de posição relativamente denso e atualizado ao longo do trajeto.

Essa dependência torna-se um problema quando o fluxo de posicionamento é interrompido, atrasado ou simplesmente inexistente, seja por falha de comunicação, por limitação do equipamento embarcado ou por ausência de cobertura, situação para a qual López e Lozano (2025) propõem métodos de estimativa de curto prazo baseados em dados históricos de localização veicular automática combinados a informações esparsas, reconhecendo que a lacuna de posicionamento contínuo é uma condição real de operação e não apenas uma hipótese teórica de projeto. É exatamente nesse cenário, de posicionamento incompleto ou indisponível, que se insere o sistema avaliado neste artigo, cuja proposta é estimar o atraso e o comportamento de um veículo de transporte público a partir de evidências indiretas do ambiente e do próprio percurso, como condições climáticas, intensidade do trânsito, velocidade praticada e características da via, combinadas por meio de lógica fuzzy, em vez de depender de uma posição instantânea recebida em tempo real.

O sistema avaliado neste artigo adota uma arquitetura pensada para evolução incremental, iniciando por um núcleo de regras fuzzy explícitas e evoluindo, em módulos subsequentes, para uma camada de agentes inteligentes que representam pontos de parada e, futuramente, para técnicas de aprendizado de máquina treinadas sobre um histórico de operação ainda em formação. A representação de elementos do sistema de transporte como agentes autônomos capazes de manter estado próprio e trocar mensagens com seus vizinhos segue uma linha de pesquisa já consolidada na literatura de sistemas de transporte público, da qual são exemplos o modelo multiagente de rotas flexíveis proposto por Hadas e Ceder (2008) e a revisão estendida de soluções multiagente para os desafios de sistemas avançados de transporte público apresentada por Balbo, Mandiau e Zargayouna (2024), que situam a coordenação entre agentes representando paradas, veículos e passageiros como uma resposta recorrente à necessidade de descentralizar e tornar auditável a tomada de decisão em redes de transporte. No sistema avaliado, essas duas camadas, o núcleo fuzzy e a rede de agentes, operam de forma integrada, cada agente aciona o motor fuzzy compartilhado pela rede para avaliar o contexto ambiental do trecho sob sua responsabilidade, conforme detalhado no método de pesquisa deste artigo.

O objetivo deste artigo é apresentar a arquitetura integrada do sistema avaliado, detalhando as escolhas de projeto que sustentam o núcleo de inferência fuzzy, a forma das funções de pertinência adotadas para cada variável linguística e o protocolo de troca de mensagens entre os agentes que representam os pontos de parada, e demonstrar o comportamento resultante dessa arquitetura ao longo de uma rota estendida, mais próxima da escala espacial e temporal de um corredor urbano real. Para isso, são descritos o funcionamento do núcleo fuzzy e o protocolo de mensagens entre agentes, é construída uma rota ilustrativa com oito pontos de parada e espaçamento realista entre pontos consecutivos para a demonstração, e a cadeia de estimativas resultante é executada e analisada trecho a trecho, de modo a relatar evidências concretas sobre o funcionamento da arquitetura integrada.

Referencial teórico

A lógica fuzzy, proposta por Zadeh (1965), estende a teoria clássica de conjuntos ao admitir graus parciais de pertinência entre zero e um, em vez da associação binária de pertencimento ou não pertencimento, permitindo representar computacionalmente termos linguísticos como chuva moderada ou trânsito intenso sem a necessidade de limiares rígidos entre categorias adjacentes. Mamdani e Assilian (1975) formalizaram, a partir dessa base, um modelo de inferência composto por quatro etapas sucessivas, a fuzzificação das entradas numéricas em graus de pertinência sobre conjuntos fuzzy definidos por funções triangulares ou trapezoidais, a avaliação das regras linguísticas do tipo se-então por meio de um operador de norma triangular, tipicamente o mínimo entre os graus de pertinência das condições combinadas por E, a agregação das saídas das regras ativadas, tipicamente pelo máximo entre os conjuntos fuzzy de saída recortados por cada regra, e a defuzzificação do conjunto agregado em um valor numérico único, usualmente pelo método do centroide (ROSS, 2017). É exatamente esse pipeline que o sistema avaliado implementa por meio da biblioteca scikit-fuzzy (WARNER et al., 2024), definindo as variáveis linguísticas de entrada, chuva, trânsito, tipo de via e velocidade, e a variável de saída, atraso, e executando de forma automática a fuzzificação, a agregação por máximo e a defuzzificação por centroide a partir das regras carregadas.

A representação de pontos de parada, veículos e demais elementos de uma rede de transporte público como agentes autônomos capazes de manter estado e trocar mensagens é uma abordagem já explorada na literatura de sistemas avançados de transporte público. Hadas e Ceder (2008) propuseram um modelo multiagente para operação de rotas flexíveis em que diferentes agentes negociam ajustes de itinerário e horário em tempo real, enquanto Balbo, Mandiau e Zargayouna (2024), em revisão estendida sobre o tema, situam a arquitetura multiagente como resposta recorrente aos desafios de coordenação, incerteza e descentralização inerentes à operação de redes de transporte, destacando a troca estruturada de mensagens entre agentes como mecanismo central para propagar estimativas ao longo da rede. A rede de agentes avaliada neste artigo instancia uma versão inicial e mais restrita dessa ideia, em que cada ponto de parada mantém vizinhos anterior e posterior por linha e repassa, ao vizinho seguinte, uma mensagem contendo horário, atraso estimado e confiança, sem ainda

incorporar mecanismos de negociação entre agentes nem um agente dedicado ao veículo propriamente dito.

O cálculo do tempo de deslocamento entre dois pontos de parada, na ausência de posicionamento contínuo, depende da estimativa da distância percorrida a partir de coordenadas geográficas, para a qual o sistema utiliza a fórmula de Haversine, descrita por Sinnott (1984) como método numericamente estável para o cálculo da distância de grande círculo entre dois pontos sobre a superfície terrestre a partir de suas coordenadas de latitude e longitude. Combinada a uma velocidade de referência, essa distância permite estimar o tempo do trecho mesmo quando não há leitura de posição do veículo no momento da chegada ao ponto seguinte, o que caracteriza a estratégia de estimativa cinemática adotada pelo sistema avaliado como uma resposta direta ao problema de estimativa sob informação incompleta discutido por López e Lozano (2025).

Método de pesquisa

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada de natureza técnica e qualitativa, conduzida por meio de leitura sistemática da implementação avaliada e execução computacional controlada dos dois módulos que compõem o sistema, o núcleo de inferência fuzzy e a rede de agentes representando pontos de parada, sobre uma rota ilustrativa construída para a demonstração. Os módulos de integração com fontes externas de dados, como leitura de condições climáticas e de trânsito em tempo real, e o histórico de viagens necessário a uma validação empírica completa do sistema, ainda não estão disponíveis, o que orienta o escopo deste trabalho para a descrição da arquitetura e para a demonstração controlada de seu comportamento, e não para a medição de seu desempenho preditivo diante de dados reais de operação.

Na arquitetura integrada, a rede de agentes e o núcleo de inferência fuzzy operam de forma acoplada. Cada agente, ao ser alcançado por uma mensagem do agente anterior, aciona, para o trecho sob sua responsabilidade, o motor fuzzy compartilhado pela rede, produzindo uma leitura local de atraso a partir das variáveis ambientais daquele trecho especificamente, em vez de apenas repassar um valor calculado em outro ponto da rota. Quando nenhuma regra fuzzy é ativada para um dado contexto, o motor recorre a um valor neutro de contingência, cinquenta, o centro da escala de atraso, atribuindo confiança nula a essa leitura, o que preserva a continuidade da cadeia de estimativas mesmo diante de contextos não cobertos pela base de regras.

O protocolo de comunicação entre agentes segue uma estrutura de encadeamento sequencial ao longo de uma linha de ônibus. Cada ponto de parada mantém uma referência ao vizinho imediatamente anterior e ao vizinho imediatamente seguinte na mesma linha, e, ao ser alcançado por uma mensagem do agente anterior, contendo o identificador da rota, os horários programado e estimado de partida e chegada, e o atraso e a confiança acumulados até aquele ponto, o agente destinatário avalia o contexto ambiental do trecho recém-percorrido, produz

sua própria leitura fuzzy local, combina essa leitura com o valor herdado por meio de uma média ponderada pela confiança de cada fonte, e propaga ao vizinho seguinte uma nova mensagem, já com o atraso e a confiança atualizados, repetindo esse ciclo até o último ponto da rota, conforme ilustrado na Figura 1. A confiança atribuída à leitura local de cada trecho é derivada do maior grau de ativação entre as regras fuzzy ativadas para aquele contexto específico, sendo nula sempre que nenhuma regra é ativada e a inferência recorre ao valor neutro de contingência, e a confiança combinada resultante é a média simples entre a confiança herdada e a confiança local, uma heurística que fica sinalizada como candidata a recalibração em trabalhos futuros. Quando nenhum motor fuzzy está associado à rede, o comportamento original do sistema é preservado integralmente.

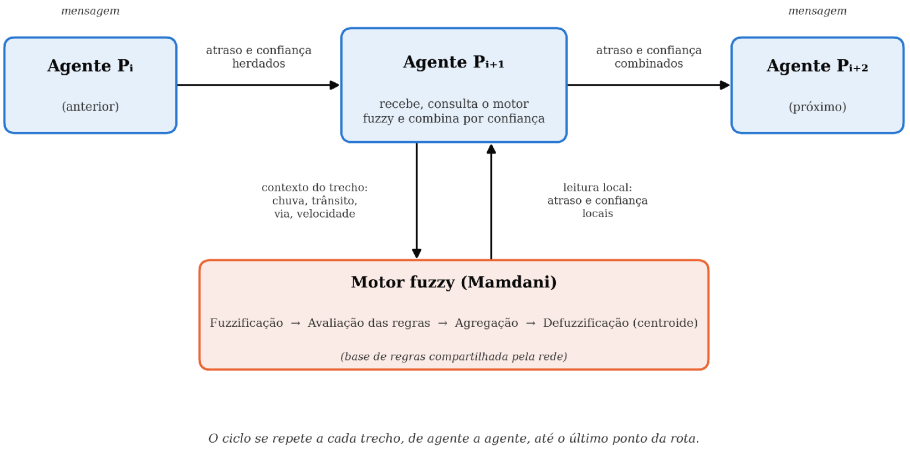


Figura 1 – Fluxo de troca de mensagens entre agentes e consulta ao motor fuzzy
Fonte: elaborado pelos autores.

A lógica fuzzy incorporada a cada agente segue o modelo de inferência do tipo Mamdani descrito no referencial teórico, aplicado de forma independente ao contexto de cada trecho da rota. As cinco variáveis de entrada, chuva, trânsito, tipo de via, velocidade praticada e atraso do agente anterior, e a variável de saída, atraso, compartilham a mesma estrutura de partição fuzzy, cada universo de discurso, normalizado no intervalo de zero a cem, foi dividido em cinco termos linguísticos, os dois termos extremos representados por funções de pertinência trapezoidais, abertas na extremidade correspondente do domínio, e os três termos intermediários representados por funções triangulares, com pertinência máxima em um único valor central e decaimento linear em direção aos termos vizinhos. A opção pela forma trapezoidal nos termos extremos, ausência de chuva e chuva forte, por exemplo, evita que a pertinência a uma condição já saturada decaia artificialmente à medida que o valor se aproxima do limite do domínio, um comportamento indesejável quando esse limite representa efetivamente uma condição extrema e persistente, e não um ponto isolado de medição. Já a forma triangular dos termos intermediários produz uma transição gradual e simétrica entre categorias adjacentes, sem introduzir platôs de pertinência máxima onde não há justificativa física para tanto, uma vez que uma condição como trânsito moderado corresponde, na prática,

a uma faixa relativamente estreita de valores em torno de um ponto central, e não a um intervalo amplo de condições igualmente representativas. Essa combinação, termos extremos trapezoidais e termos intermediários triangulares, corresponde a uma convenção amplamente adotada no projeto de sistemas de inferência fuzzy do tipo Mamdani, na qual funções trapezoidais nas extremidades do domínio evitam a perda artificial de pertinência sob condições já saturadas e funções triangulares nas regiões centrais oferecem a resolução necessária para representar transições suaves entre categorias adjacentes com o menor número possível de parâmetros por termo, um a menos do que o exigido pela forma trapezoidal (ROSS, 2017). Essa mesma partição se repete de forma idêntica na variável de saída, o que confere uniformidade interpretativa à arquitetura, o valor cinquenta corresponde sempre ao centro do termo no horário, tanto quando a variável representa o atraso calculado para o trecho atual quanto quando representa o atraso herdado do agente anterior, reutilizado como entrada normalizada em trechos subsequentes da cadeia.

Formalmente, uma função de pertinência trapezoidal é definida por quatro parâmetros, a, b, c e d. Esses parâmetros demarcam, respectivamente, o início e o fim da rampa ascendente e o início e o fim da rampa descendente. A pertinência é nula para valores menores ou iguais a "a" ou maiores ou iguais a "d". Entre "a" e "b", ela cresce linearmente de zero a um; entre "b" e "c", permanece igual a um, caracterizando a pertinência plena; e entre "c" e "d", decresce linearmente de um a zero. Já uma função de pertinência triangular é definida por apenas três parâmetros, a, b e c. Nesse caso, a pertinência é nula em "a" e em "c", atinge seu valor máximo, igual a um, apenas no ponto central "b", e decai linearmente entre esses três pontos, sem qualquer intervalo de platô. A Tabela 1 e a Figura 2 ilustram esse padrão de partição por meio da variável chuva, tomada como exemplo representativo das demais variáveis do sistema, todas particionadas segundo o mesmo princípio: dois termos extremos trapezoidais e três termos intermediários triangulares, sobre um domínio normalizado de zero a cem

Tabela 1 – Partição fuzzy da variável chuva, tomada como exemplo da estrutura adotada nas demais variáveis

Termo linguístico	**Forma**	**Parâmetros (a, b, c[, d])**
Ausência de chuva	Trapezoidal	0; 0; 10; 25
Chuva leve	Triangular	10; 30; 50
Chuva moderada	Triangular	40; 60; 80
Chuva forte	Trapezoidal	70; 85; 100; 100

Fonte: elaborado pelos autores, a partir da definição das funções de pertinência do sistema avaliado.

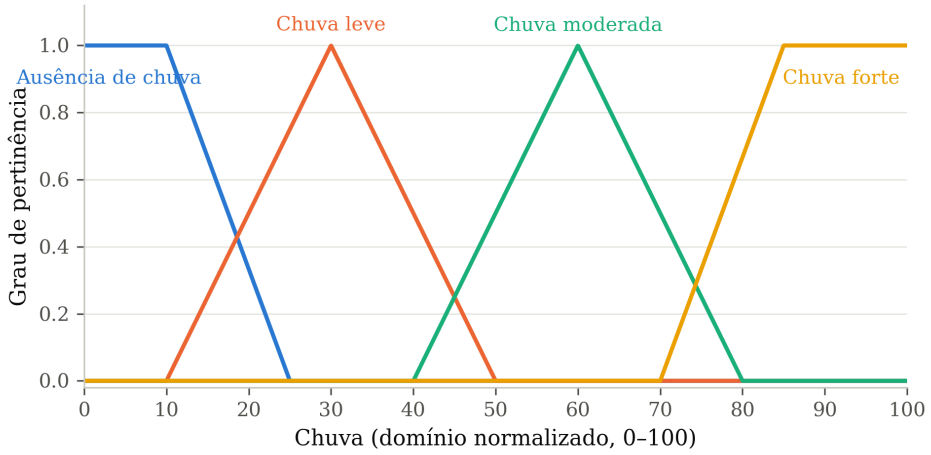


Figura 2 – Funções de pertinência da variável chuva
Fonte: elaborado pelos autores, a partir dos parâmetros apresentados na Tabela 1.

Uma regra representativa da base ilustra concretamente o formato adotado e sua avaliação. A regra identificada como A01 associa as condições chuva forte e trânsito intenso, combinadas pelo operador mínimo próprio da conjunção E no modelo de Mamdani, à conclusão muito atrasado. No trecho de maior severidade ambiental desta demonstração, P003 para P004, cujo contexto correspondia a chuva igual a noventa e trânsito igual a setenta e cinco no domínio normalizado, a pertinência ao termo chuva forte alcançou grau um inteiro, uma vez que noventa já se situa no patamar de pertinência plena da função trapezoidal descrita na Tabela 1, e a pertinência ao termo trânsito intenso, de forma análoga, também alcançou grau um inteiro. O grau de ativação da regra A01 para esse trecho resultou, portanto, do mínimo entre esses dois graus, um inteiro, e seu conjunto de saída, recortado nesse grau máximo, contribuiu de forma decisiva para a leitura fuzzy local de 83,54 relatada na Tabela 4, a mais alta de toda a rota, confirmando o funcionamento do pipeline de fuzzificação, avaliação e agregação descrito no referencial teórico sobre um caso concreto da base de regras de produção.

Para demonstrar o funcionamento da arquitetura integrada ao longo de uma rota mais extensa do que a inicialmente disponibilizada para avaliação, foi construída uma rota ilustrativa com oito pontos de parada consecutivos, com espaçamento realista entre pontos vizinhos, da ordem de um quilômetro, compatível com a distância típica entre paradas em um corredor urbano, substituindo o cenário de teste originalmente fornecido pelo sistema, que utilizava pontos separados por apenas cerca de cento e cinquenta metros e produzia trechos concluídos em menos de vinte segundos, uma escala sem significado prático para uma análise de atraso expressa em minutos. Foram definidos sete trechos com contextos ambientais diferentes entre si, cobrindo o espectro dos domínios das variáveis fuzzy de entrada, de uma condição inicial quase ideal, chuva fraca e trânsito baixo, passando por uma piora progressiva até um trecho de condição adversa, chuva forte, trânsito intenso, via em más condições e velocidade baixa, e retornando gradualmente a condições favoráveis nos últimos trechos da rota, conforme resumido na Tabela 2, de modo a observar o comportamento da cadeia de estimativas tanto

diante de uma transição abrupta quanto de uma recuperação gradual das condições de operação.

Tabela 2 – Cenários de contexto utilizados em cada trecho da rota de oito pontos

Trecho	Chuva	Tráfego	Via	Velocidade
P001 → P002	10	20	15	20
P002 → P003	30	55	40	45
P003 → P004 (pico adverso)	90	75	80	75
P004 → P005	70	65	70	65
P005 → P006	30	40	35	35
P006 → P007	10	15	10	15
P007 → P008 (ideal)	0	5	5	5

Fonte: elaborado pelos autores, valores no domínio 0-100 de cada variável fuzzy.

Resultados e discussão

A execução cinemática da rota de oito pontos independe da base de regras utilizada, uma vez que depende exclusivamente das coordenadas geográficas dos pontos de parada e da velocidade de referência atribuída a cada trecho. Com os pontos de parada posicionados em um espaçamento realista, essa execução produziu trechos com significado prático para uma análise em minutos, com tempos individuais entre 1,69 e 3,65 minutos e uma distância total percorrida de aproximadamente 7,50 quilômetros, concluída em cerca de 17,06 minutos de deslocamento estimado, conforme detalhado na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado cinemático dos sete trechos da rota, com espaçamento realista entre paradas

Trecho	Distância (m)	Veloc. utilizada (km/h)	Tempo do trecho (min)
P001 → P002	1.067,50	38,00	1,69
P002 → P003	1.095,65	28,00	2,35
P003 → P004	1.096,24	18,00	3,65
P004 → P005	1.059,74	20,00	3,18
P005 → P006	1.059,71	26,00	2,45
P006 → P007	1.060,57	33,00	1,93
P007 → P008	1.060,54	35,00	1,82

Fonte: elaborado pelos autores, a partir da execução direta da arquitetura integrada sobre a rota de oito pontos.

A cadeia integrada de estimativas de atraso foi executada sobre a base de regras utilizada em produção, com cinquenta e nove regras distribuídas em dez grupos, de A a J. Em cada um dos sete trechos da rota, entre quatro e seis regras foram ativadas simultaneamente pelo contexto ambiental correspondente, o que evidencia uma cobertura consistente e granular da base de produção diante da diversidade de cenários propostos. A leitura fuzzy local de cada trecho foi então combinada com o valor herdado do agente anterior segundo o protocolo de fusão por confiança descrito no método de pesquisa, produzindo a sequência de estimativas detalhada na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado da cadeia integrada de estimativas de atraso ao longo da rota de oito pontos, sobre a base de regras de produção

Agente	Atraso herdado	Leitura fuzzy local (regras)	Atraso combinado (confiança)	Atraso (min)
P001 (origem)	—	—	50,00 (conf. 1,00)	0,00

Agente	Atraso herdado	Leitura fuzzy local (regras)	Atraso combinado (confiança)	Atraso (min)
P002	50,00	25,00 (5 regras)	40,00 (conf. 0,83)	-0,40
P003	40,00	50,00 (4 regras)	43,75 (conf. 0,67)	-0,25
P004	43,75	83,54 (4 regras)	67,62 (conf. 0,83)	+0,70
P005	67,62	75,00 (5 regras)	69,73 (conf. 0,58)	+0,79
P006	69,73	50,00 (5 regras)	63,81 (conf. 0,42)	+0,55
P007	63,81	16,89 (6 regras)	38,22 (conf. 0,46)	-0,47
P008	38,22	7,78 (4 regras)	17,34 (conf. 0,73)	-1,31

Fonte: elaborado pelos autores, a partir da execução real da arquitetura integrada sobre a rota de oito pontos, com a base de regras de produção.

A trajetória do atraso combinado ao longo da rota revela um comportamento gradual, e não uma resposta imediata à severidade de cada contexto isolado. O atraso combinado cresce de forma contínua do agente de origem até o quinto ponto de parada, atingindo o valor máximo de toda a rota, 69,73, equivalente a 0,79 minuto, um trecho além daquele de maior severidade ambiental, P003 para P004, cuja leitura fuzzy local isolada, 83,54, foi a mais alta registrada na simulação. Esse deslocamento de uma posição entre o pico de severidade ambiental e o pico de atraso combinado decorre diretamente do mecanismo de fusão por confiança, o valor herdado de P004 ainda carrega peso suficiente na combinação de P005 para elevar o resultado combinado além do que o contexto do trecho P004 para P005, isoladamente moderado, justificaria. A partir do sexto ponto, o atraso combinado declina de forma sustentada, atravessa o valor neutro entre P006 e P007, e encerra a rota em 17,34, equivalente a -1,31 minuto, o maior desvio em módulo de toda a simulação, indicando um pequeno adiantamento na chegada ao último ponto de parada.

O trecho entre o sexto e o sétimo ponto de parada ilustra com clareza a etapa de agregação e defuzzificação do motor fuzzy descrita no referencial teórico. Seis regras distintas foram ativadas simultaneamente para o contexto desse trecho, com graus de ativação entre 0,333 e 0,500, associadas a dois termos linguísticos de saída vizinhos, adiantado e bem adiantado, cujos conjuntos fuzzy foram agregados pelo operador máximo e, em seguida, reduzidos a um único valor numérico pelo método do centroide, produzindo uma leitura local de 16,89, situada entre os centros dos dois termos ativados e mais próxima daquele de maior grau de ativação. Esse resultado exemplifica, de forma concreta e reprodutível, como a combinação de regras com consequentes distintos, mesmo sem qualquer conflito lógico entre elas, molda o valor final entregue pelo motor fuzzy de maneira proporcional aos graus de ativação envolvidos.

A confiança combinada não decresce de forma monotônica ao longo da rota, oscilando antes entre 1,00 e 0,42, o valor mais baixo registrado, no sexto ponto de parada, e recuperando-se de forma acentuada nos dois trechos finais, 0,46 e 0,73. Essa trajetória é explicada pela confiança local de cada trecho, isto é, o maior grau de ativação entre as regras acionadas por aquele contexto específico, que atinge o valor máximo, 1,00, exatamente nos dois trechos cujos contextos se aproximam dos extremos saturados do domínio de cada variável, o trecho de pico adverso, P003 para P004, e o trecho de condição quase ideal, P007 para P008, e cai para valores entre 0,25 e 0,50 nos demais trechos, cujos contextos correspondem a regiões de

transição entre termos linguísticos vizinhos. Essa correspondência decorre diretamente da forma das funções de pertinência adotadas, discutida no método de pesquisa, os termos extremos de cada variável, representados por funções trapezoidais, saturam a pertinência em grau máximo já próximo da extremidade do domínio, permitindo que múltiplas regras atinjam ativação plena e simultânea nesses dois trechos, ao passo que os termos intermediários, representados por funções triangulares, produzem necessariamente graus de ativação fracionários nas regiões de transição, e por consequência confiança local mais moderada. O indicador de confiança combinada, assim, mede a nitidez do enquadramento do contexto local em um termo linguístico bem definido, e não a severidade da condição observada, uma vez que o trecho ambientalmente mais adverso da rota produziu confiança local tão alta quanto o trecho ambientalmente mais favorável.

A amplitude observada entre o valor mínimo e o valor máximo do atraso combinado ao longo da rota, de -1,31 a 0,79 minuto, totaliza um desvio de 2,10 minutos, correspondente a mais da metade da amplitude total de quatro minutos disponível na conversão de atraso fuzzy para minutos. Esse resultado indica que a arquitetura integrada, executada sobre a base de regras de produção e sobre uma sequência de contextos ambientais suficientemente diversa, é capaz de explorar uma parcela substancial da escala de saída disponível, ainda que uma análise preliminar, sobre uma base de regras de menor porte, tenha sugerido uma amplitude mais conservadora. Permanece, todavia, o risco de saturação nos limites de menos dois e mais dois minutos diante de sequências de trechos consecutivamente mais adversas do que as reproduzidas nesta demonstração, o que reforça a recomendação de recalibrar essa conversão assim que houver histórico real de atrasos observados.

Considerações finais

Este artigo apresentou uma arquitetura integrada que combina um núcleo de inferência fuzzy e uma rede de agentes representando pontos de parada, capaz de estimar o atraso de veículos de transporte público a partir de evidências indiretas do ambiente, em cenários de indisponibilidade de posicionamento contínuo por GPS. Na arquitetura descrita, cada agente aciona sua própria inferência fuzzy sobre o contexto do trecho local e combina essa leitura, por confiança, com o valor herdado do agente anterior.

A demonstração da arquitetura integrada sobre uma rota de oito pontos de parada, com espaçamento realista de aproximadamente um quilômetro e sete trechos com contextos ambientais diversos, executada sobre a base de regras de produção, com cinquenta e nove regras, produziu estimativas de atraso coerentes e em uma escala de minutos com significado prático, entre -1,31 e 0,79 minuto, e permitiu observar dois comportamentos relevantes para a evolução do sistema. O primeiro é o deslocamento de uma posição, ao longo da cadeia, entre o trecho de maior severidade ambiental e o trecho de maior atraso combinado, efeito da inércia introduzida pela fusão por confiança, que mantém o valor herdado de um trecho adverso pesando sobre a estimativa do trecho seguinte. O segundo é a natureza oscilatória, e não monotônica, da confiança combinada, que atinge seus valores mais altos exatamente nos

trechos cujos contextos se aproximam dos extremos saturados do domínio das variáveis fuzzy, e seus valores mais baixos nos trechos de contexto intermediário, evidenciando que esse indicador mede a nitidez do enquadramento do contexto em um termo linguístico, e não a severidade da condição observada.

Como trabalhos futuros, recomenda-se introduzir um fator de decaimento na fusão por confiança, de modo que estimativas mais antigas na cadeia percam peso gradualmente em favor de leituras mais recentes, recalibrar a amplitude da conversão de atraso fuzzy para minutos assim que houver histórico real de operação disponível, e implementar os módulos de integração com fontes externas de dados ainda ausentes, de modo a viabilizar uma validação empírica completa do sistema em condições reais de operação, na forma de um artigo subsequente apoiado em dados de campo.

Referências

BALBO, F.; MANDIAU, R.; ZARGAYOUNA, M. Extended review of multi-agent solutions to Advanced Public Transportation Systems challenges. Public Transport, v. 16, n. 1, p. 159-186, 2024.

HADAS, Y.; CEDER, A. Multiagent approach for public transit system based on flexible routes. Transportation Research Record, v. 2063, n. 1, p. 89-96, 2008.

LÓPEZ, D.; LOZANO, A. Short-term estimation for transit vehicle locations using AVL information and historical data. Transportation Research Procedia, v. 82, p. 1-10, 2025.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. International Journal of Man-Machine Studies, v. 7, n. 1, p. 1-13, 1975.

ROSS, T. J. Fuzzy logic with engineering applications. 4. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2017.

SINGH, N.; KUMAR, K. A review of bus arrival time prediction using artificial intelligence. WIREs Data Mining and Knowledge Discovery, v. 12, n. 1, e1457, 2022.

SINNOTT, R. W. Virtues of the haversine. Sky and Telescope, v. 68, n. 2, p. 159, 1984.

WARNER, J.; SEXAUER, J.; VAN DEN BROECK, W.; KINOSHITA, B. P.; BALINSKI, J.; CLAUSS, C. et al. JDWarner/scikit-fuzzy: Scikit-Fuzzy 0.5.0. Zenodo, 2024.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. Information and Control, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.