

Emergency Evacuation Analysis in a School Building via Agent-Based Simulations

Kaique de Oliveira¹, Guilherme Rode¹, Fernando Santos¹

¹Departamento de Engenharia de Software
Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) – Ibirama, SC – Brasil

{kaique.oliveira12, guilherme.rode}@edu.udesc.br, fernando.santos@udesc.br

Abstract. *Evacuation planning in school buildings is essential for the safety of students and staff. This study presents an agent-based simulation of the evacuation of ECIM EEB Walmor Ribeiro, located in the Dalbérzia neighborhood of Ibirama, Santa Catarina, using PTV Vissim and its pedestrian dynamics module, PTV Viswalk. The simulation models the school's physical environment and various emergency scenarios, enabling the analysis of pedestrian flow, the identification of congestion, and the estimation of safe evacuation time. Evacuation times ranged from 22 to 138 seconds. The school's physical layout did not cause severe congestion in any of the scenarios evaluated, indicating that periodic evacuation drills tend to be effective.*

Resumo. *O planejamento de evacuação em edificações escolares é fundamental para a segurança de alunos e funcionários. Este trabalho apresenta uma simulação baseada em agentes da evacuação da ECIM EEB Walmor Ribeiro, no bairro de Dalbérzia, em Ibirama-SC, utilizando o PTV Vissim e seu módulo de dinâmica de pedestres PTV Viswalk. A simulação modela o ambiente físico da escola e distintos cenários de emergência, permitindo a análise do fluxo de pessoas, a identificação de congestionamentos e a estimativa do tempo de saída segura. Os tempos de evacuação variaram de 22 a 138 segundos. A configuração física da escola não induziu congestionamentos severos em nenhum dos cenários avaliados, indicando que treinamentos periódicos de evacuação tendem a ser eficazes.*

1. Introdução

Situações de emergência em edificações escolares representam riscos significativos à vida de crianças e adolescentes. A eficiência de uma evacuação depende de fatores como disposição dos espaços, largura das rotas de fuga, densidade de ocupantes e comportamento dos pedestres em situações de pânico [Helbing et al. 2000]. A ECIM EEB Walmor Ribeiro, localizada no bairro Dalbérzia, em Ibirama-SC, atende 449 estudantes do Ensino Fundamental II e do Ensino Médio distribuídos nos turnos matutino, vespertino e noturno, além de contar com 75 funcionários, totalizando 524 pessoas que circulam pela instituição em dia letivo, tornando-se um objeto de estudo representativo para análise de evacuação em escolas públicas de porte médio.

Apesar da relevância do tema, muitas instituições de ensino não dispõem de estudos sobre tempos de evacuação e possíveis gargalos nas rotas de saída. A ausência desses dados dificulta decisões sobre melhorias na planta física e procedimentos de emergência.

Simulações Baseadas em Agentes (SBA) constituem um paradigma de simulação em que cada indivíduo do sistema é representado por um agente autônomo, capaz de perceber o ambiente e interagir com outros agentes de forma independente [Bonabeau 2002]. Entre as vantagens deste paradigma, destaca-se a possibilidade de observar o fenômeno sob duas perspectivas: a do agente, com diferentes estratégias de tomada de decisão, e a do ambiente, com os resultados gerados a partir das ações e interações dos agentes. Isso permite modelar o comportamento individual de cada ocupante e analisar cenários de emergência de forma controlada, sem expor estudantes e funcionários a riscos reais.

Este trabalho descreve uma simulação de evacuação de emergência da instituição utilizando o PTV Vissim e o módulo PTV Viswalk [PTV Group 2024]. Os agentes são governados pelo Social Force Model (SFM) [Helbing and Molnár 1995], que modela as motivações dos pedestres como forças virtuais de aceleração e repulsão. Os parâmetros de velocidade são diferenciados por faixa etária com base em [Simeunović et al. 2021], distinguindo o perfil dos estudantes do Ensino Fundamental II dos do Ensino Médio. São avaliados 72 combinações variando a disponibilidade das rotas de fuga, com base metodológica no trabalho de [Frare 2024], que adotou abordagem equivalente em edificação universitária com o mesmo conjunto de ferramentas.

Os resultados obtidos indicam que os tempos de evacuação variam de 22 a 138 segundos dependendo do cenário, turno e regime de velocidade adotado. O cenário mais crítico foi aquele em que apenas a saída dos fundos estava disponível, enquanto o melhor desempenho ocorreu quando todas as saídas estavam abertas. A ausência do efeito *faster-is-slower* em todos os cenários sugere que a configuração física da escola — térrea e com corredores amplos — não gera gargalos críticos, e que estratégias de evacuação rápida tendem a ser benéficas para a instituição. Os tempos de evacuação obtidos satisfazem a normativa vigente, que recomenda que o tempo total de evacuação em estabelecimentos escolares não exceda 3 minutos [Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina 2018].

2. Trabalhos Relacionados

[Frare 2024] desenvolveu uma simulação de evacuação de emergência do Bloco Imbuia da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), campus Alto Vale, utilizando o software PTV Vissim em conjunto com o módulo PTV Viswalk. O trabalho modelou os espaços físicos do edifício universitário, incluindo corredores, escadas e saídas, e simulou cenários de evacuação com diferentes velocidades de deslocamento baseadas no SFM. O principal resultado obtido foi a identificação dos pontos de congestionamento e a estimativa do tempo de evacuação, tendo o autor proposto a implementação de novas saídas como medida para reduzir os gargalos identificados. A diferença em relação ao presente trabalho está no contexto simulado e nos cenários avaliados: enquanto [Frare 2024] modelou uma edificação universitária com ocupantes adultos e testou a adição de novas saídas, este trabalho simula uma escola de educação básica com estudantes do Ensino Fundamental II e do Ensino Médio e avalia cenários de bloqueio de saídas existentes, além de adotar perfis de agentes diferenciados por faixa etária.

[Tsai et al. 2011] desenvolveram o sistema ESCAPES, uma simulação baseada em agentes para evacuação de emergência em escola, modelando agentes com perfis distintos (crianças, autoridades, pais e demais ocupantes) e incorporando aspectos emocionais e de comparação social ao comportamento de cada agente. O principal resultado

obtido foi a identificação de que fatores como o layout do ambiente, o estado emocional dos ocupantes e a disponibilidade de informações durante a evacuação influenciam significativamente o tempo e a segurança do processo de fuga. Em relação ao presente trabalho, a diferença reside na abordagem de modelagem dos agentes e nos cenários avaliados: enquanto [Tsai et al. 2011] priorizaram a representação comportamental e emocional dos agentes em um contexto genérico de escola, este trabalho utiliza o SFM no PTV Viswalk para simular a dinâmica física dos pedestres em uma edificação escolar real, diferenciando os agentes por faixa etária e avaliando o impacto do bloqueio das saídas disponíveis.

[Silva et al. 2017] desenvolveram uma simulação multiagente da evacuação da boate Kiss, tragédia ocorrida em Santa Maria-RS em 2013, utilizando o NetLogo. O trabalho modelou o ambiente físico da boate com base em sua planta baixa real e simulou dois cenários principais: o realístico, com superlotação de 1.200 pessoas e apenas uma saída, e o ideal, configurado conforme a NBR 9.077, com população de 691 pessoas, duas saídas de emergência e sinalização adequada. O principal resultado obtido foi que, no cenário realístico, cerca de 34% dos ocupantes não conseguiram evacuar, enquanto no cenário ideal essa proporção caiu para 2%, evidenciando o impacto direto do cumprimento das normas de segurança. Além disso, o estudo demonstrou que a sinalização correta retarda a disseminação do pânico em aproximadamente 74% do tempo em relação ao cenário sem NBR. Em relação ao presente trabalho, a diferença reside tanto na edificação simulada quanto na abordagem de modelagem dos agentes: enquanto [Silva et al. 2017] priorizaram o comportamento emocional de pânico e a conformidade normativa em uma casa noturna, este trabalho utiliza o SFM no PTV Viswalk para modelar a dinâmica física dos pedestres em uma escola pública, diferenciando os agentes por faixa etária e avaliando o impacto do bloqueio das rotas de fuga disponíveis.

3. Descrição da Simulação

3.1. Visão Geral

A simulação tem como objeto a ECIM EEB Walmor Ribeiro, escola pública localizada no bairro Dalbérgia, no município de Ibirama, Santa Catarina. A escola atende 449 estudantes distribuídos em três turnos: 208 no matutino e 151 no vespertino, ambos compostos majoritariamente por alunos do Ensino Fundamental II (311 alunos no total), e 90 estudantes no noturno, correspondentes ao Ensino Médio (138 alunos no total). Além dos estudantes, a instituição conta com 75 funcionários entre professores, merendeiras e seguranças, totalizando 524 pessoas que circulam pela escola em dia letivo. A edificação possui 11 salas de aula, corredor principal, ginásio, refeitório, três saídas de acesso: a saída principal, a saída lateral e a saída dos fundos, em anexo ao ginásio. A Figura 1 apresenta a fachada frontal da escola, onde são visíveis a saída principal e a saída lateral.

3.2. Plataforma de Simulação

O PTV Vissim é um software de microsimulação de tráfego desenvolvido pela PTV Group [PTV Group 2024]. O módulo PTV Viswalk implementa o Social Force Model (SFM), proposto originalmente por [Helbing and Molnár 1995]. No SFM, cada agente é modelado como uma partícula autopropulsionada sob a influência de três forças: (i) uma força de aceleração em direção à velocidade desejada; (ii) forças repulsivas em relação aos demais pedestres; e (iii) forças repulsivas em relação a obstáculos e paredes. Esse



Figura 1. Fachada da ECIM EEB Walmor Ribeiro.

modelo permite representar comportamentos emergentes como congestionamentos e filas, incluindo o efeito *faster-is-slower* [Helbing et al. 2000], em que o aumento da velocidade desejada pelos agentes pode, em certos casos, aumentar o tempo total de evacuação. Os arquivos do projeto de simulação estão disponíveis publicamente.¹

A escolha do SFM justifica-se pela natureza do fenômeno estudado: o SFM representa adequadamente o deslocamento físico agregado de pedestres em situações de fluxo denso, sem exigir a modelagem de processos cognitivos individuais de tomada de decisão, que não são o foco deste trabalho. Modelos de maior granularidade seriam mais adequados para investigar, por exemplo, decisões de rota sob incerteza ou comportamento social divergente durante o pânico, mas aumentariam substancialmente a complexidade de calibração sem benefício proporcional para a estimativa do Tempo Total de Evacuação (TTE), que é o objetivo central desta análise.

A escolha do PTV Vissim/Viswalk, por sua vez, deve-se à sua consolidação como ferramenta de referência no mercado e na literatura de simulação de pedestres e evacuação, com implementação validada do SFM, além de compatibilidade direta com o trabalho de [Frare 2024], que adotou a mesma ferramenta, permitindo maior comparabilidade metodológica entre os estudos.

3.3. Modelagem da Simulação

O ambiente físico da ECIM EEB Walmor Ribeiro foi reproduzido no PTV Vissim com base na planta baixa da edificação, e a dinâmica dos pedestres é gerenciada pelo módulo PTV Viswalk, conforme apresentado na Figura 2. A edificação possui 11 salas de aula, corredor principal, ginásio, refeitório e três saídas de acesso, identificadas como: Saída 1 (principal), Saída 2 (lateral) e Saída 3 (fundos, em anexo ao ginásio).

¹<https://github.com/agentbasedsimulations/2026-wesaac-simulacao-evacuacao-escolar>



Figura 2. Planta da ECIM EEB Walmor Ribeiro - Simulado no PTV Vissim.

A reprodução do ambiente físico da ECIM EEB Walmor Ribeiro no PTV Vissim apresentou desafios relevantes, relacionados principalmente à qualidade e à fragmentação das plantas arquitetônicas disponíveis. Por se tratar de uma edificação antiga, as plantas disponíveis encontravam-se em formato físico e com baixa precisão, exigindo a utilização de duas plantas distintas: uma contendo as dimensões das paredes e outra com a localização e dimensões das portas. A integração manual dessas duas fontes demandou tempo considerável de trabalho, aumentando a curva de aprendizado no uso do software e impactando o cronograma de desenvolvimento da simulação.

Os agentes representam os ocupantes da escola, divididos em dois perfis: estudantes e funcionários. Para os estudantes, os parâmetros de velocidade foram definidos com base em [Simeunović et al. 2021], que mediram experimentalmente a velocidade de deslocamento de pedestres entre 7 e 20 anos em cinco regimes de movimento. Em seu estudo, [Simeunović et al. 2021] reportam as velocidades segmentadas por faixa etária dentro desse intervalo; no presente trabalho, os estudantes do Ensino Fundamental II (tipicamente entre 11 e 14 anos) e do Ensino Médio (tipicamente entre 15 e 17 anos) foram mapeados às faixas etárias correspondentes reportadas por [Simeunović et al. 2021], o que explica a diferença de velocidade entre os dois perfis observada na Tabela 1.

Para este trabalho foram adotados quatro regimes compatíveis com situações de evacuação: Normal, Rápido, Corrida e Pânico, calculados como média entre as amostras masculina e feminina do estudo para cada faixa etária. Para os funcionários adultos, foram adotados os parâmetros de referência utilizados por [Frare 2024], que por sua vez baseou-

se nos estudos clássicos de [Weidmann 1993] e [Predtechenskii and Milinskii 1978], amplamente utilizados como referência internacional para velocidades de pedestres em evacuações, sendo o regime de Corrida equiparado ao de Pânico por ausência de valor intermediário no estudo de referência. A Tabela 1 apresenta os valores adotados para cada perfil e regime de movimento.

Tabela 1. Velocidade dos agentes (m/s) por perfil e regime de movimento

Regime	Estudantes		
	Ensino Fundamental II	Ensino Médio	Funcionários
Normal	1,59	1,53	1,20
Rápido	2,19	2,27	1,53
Corrida	2,89	2,94	3,33
Pânico	4,05	4,23	3,33

As forças repulsivas do SFM, entre pedestres e entre pedestres e obstáculos, foram mantidas nos valores padrão do PTV Viswalk, sem calibração específica para este estudo. Diferentemente da força de aceleração em direção à velocidade desejada, diferenciada por perfil e faixa etária conforme a Tabela 1, os parâmetros de repulsão do Viswalk não distinguem perfis de agentes: um mesmo obstáculo é tratado da mesma forma, independentemente da idade ou do regime de movimento do agente, e nenhum obstáculo modelado é intransponível. A calibração diferenciada dessas forças por perfil está fora do escopo deste trabalho, cujo foco é a estimativa do TTE sob diferentes condições de disponibilidade de rotas, permanecendo como oportunidade de trabalho futuro.

3.4. Cenários Simulados

Foram definidos seis cenários de evacuação variando a disponibilidade das saídas da escola, conforme a Tabela 2. O Cenário C1 representa a situação ideal, com todas as saídas disponíveis, servindo como referência para comparação. Os demais cenários simulam restrições progressivas de acesso às saídas, desde combinações parciais até situações em que apenas uma saída permanece disponível, representando casos de bloqueio por obstáculos ou emergências localizadas.

Tabela 2. Cenários de evacuação simulados

Cenário	Descrição	Cenário	Descrição
C1	Todas as saídas abertas	C4	Lateral e fundos
C2	Somente saída principal	C5	Somente saída lateral
C3	Principal e lateral	C6	Somente saída dos fundos

Cada cenário foi avaliado nos três turnos de funcionamento da escola: matutino (208 alunos) e vespertino (151 alunos), ambos com estudantes do Ensino Fundamental II e do Ensino Médio, e noturno (90 alunos), composto exclusivamente por estudantes do Ensino Médio. Para cada combinação de cenário e turno foram aplicados os quatro regimes de velocidade da Tabela 1, totalizando 72 combinações (6 cenários $\times$ 3 períodos $\times$ 4 velocidades). Cada combinação foi executada 5 vezes de forma independente, permitindo capturar a variabilidade natural do comportamento dos agentes, resultando em 360 execuções no total.

4. Resultados e Discussão

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas 72 combinações de cenário, turno e regime de velocidade, cada uma executada cinco vezes de forma independente, totalizando 360 execuções. Para cada combinação foi calculada a média e o desvio padrão do Tempo Total de Evacuação (TTE), definido como o instante em que o último agente deixa a edificação. A Figura 3 ilustra a simulação em execução no PTV Viswalk.

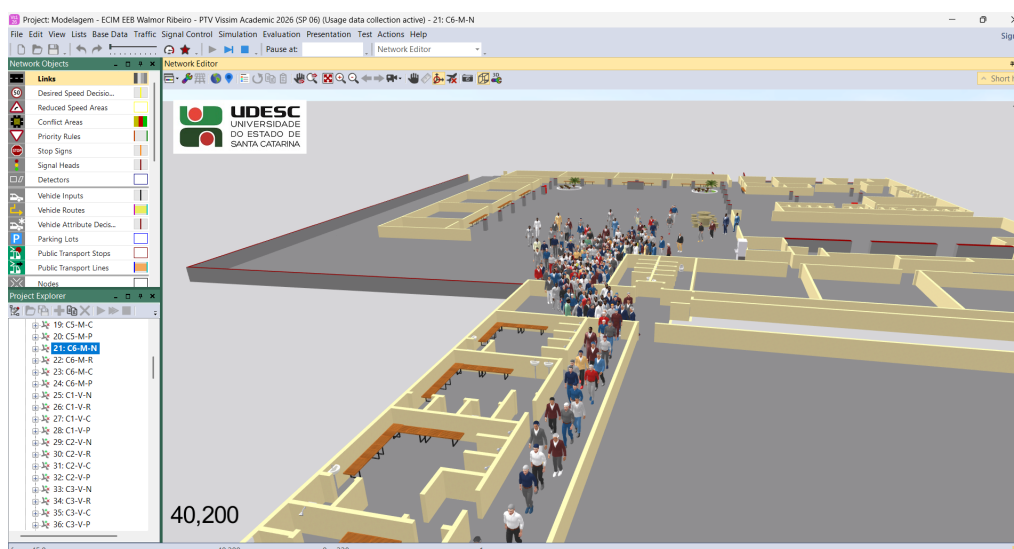


Figura 3. Visualização da simulação de evacuação no PTV Viswalk.

4.1. Tempo Total de Evacuação por Combinação

As Tabelas 3, 4 e 5 apresentam os valores médios de TTE e seus desvios padrão para cada cenário e regime de velocidade, separados por turno. A consistência dos dados é evidenciada pelos baixos desvios padrão, que indicam uma variabilidade controlada entre as execuções e reforçam a confiabilidade dos resultados. A Figura 4 sintetiza o TTE médio por cenário, consolidando os valores entre turnos e regimes de velocidade. Em todas as combinações avaliadas, o TTE diminuiu à medida que se passava do regime Normal para o Pânico, confirmando a relação esperada: *Normal* > *Rápido* > *Corrida* > *Pânico*.

Este resultado indica que, para a configuração física da escola, o aumento da velocidade desejada se traduz em uma redução contínua e consistente no tempo de evacuação da edificação. Os dados detalhados da análise por turno e regime de velocidade, que confirmam essa tendência, são apresentados nas subseções seguintes.

Tabela 3. TTE turno matutino (233 agentes)

Cenário	Normal	Rápido	Corrida	Pânico
C1	86,40 ± 3,62	63,42 ± 0,97	37,13 ± 1,64	28,44 ± 0,63
C2	105,93 ± 7,68	71,44 ± 4,04	40,82 ± 0,57	28,09 ± 1,93
C3	89,11 ± 4,39	61,85 ± 4,39	37,70 ± 0,48	27,73 ± 1,01
C4	129,62 ± 4,08	64,83 ± 1,46	39,33 ± 0,80	29,03 ± 0,80
C5	114,36 ± 5,66	72,92 ± 0,83	41,86 ± 0,55	29,85 ± 0,83
C6	138,07 ± 2,18	93,64 ± 1,41	50,02 ± 0,66	39,42 ± 0,50

Tabela 4. TTE turno vespertino (176 agentes)

Cenário	Normal	Rápido	Corrida	Pânico
C1	83,20 ± 2,82	63,26 ± 1,47	37,16 ± 0,95	28,46 ± 0,54
C2	83,56 ± 5,43	55,57 ± 2,63	37,13 ± 0,23	25,98 ± 0,21
C3	79,19 ± 2,97	58,10 ± 3,89	37,67 ± 0,36	27,76 ± 0,81
C4	88,87 ± 3,90	64,47 ± 2,18	39,23 ± 0,47	28,78 ± 0,62
C5	105,67 ± 1,61	69,66 ± 1,68	41,04 ± 0,23	29,43 ± 0,34
C6	120,68 ± 4,00	85,18 ± 2,13	44,82 ± 0,60	36,23 ± 0,80

Tabela 5. TTE turno noturno (115 agentes)

Cenário	Normal	Rápido	Corrida	Pânico
C1	82,10 ± 3,46	62,74 ± 2,23	31,72 ± 0,49	28,28 ± 0,69
C2	66,30 ± 2,40	48,37 ± 1,75	29,46 ± 0,36	22,37 ± 0,67
C3	75,44 ± 5,31	57,65 ± 4,55	30,85 ± 0,18	26,64 ± 1,75
C4	86,71 ± 3,17	64,31 ± 2,12	32,95 ± 0,45	28,59 ± 0,69
C5	91,39 ± 0,91	63,16 ± 1,70	33,58 ± 0,28	28,21 ± 0,26
C6	112,82 ± 1,99	74,27 ± 1,13	38,76 ± 0,67	32,03 ± 0,62

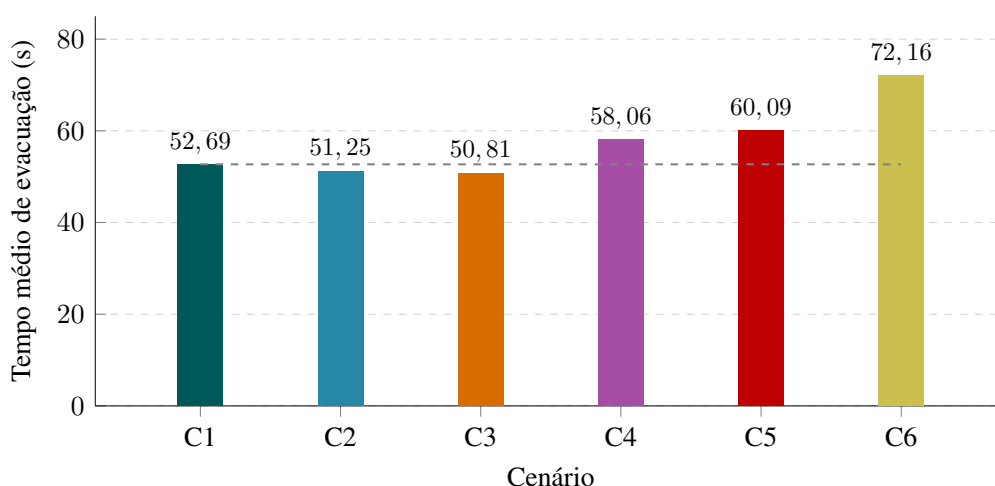


Figura 4. TTE médio por cenário (média entre turnos e regimes). Linha contínua: referência do Cenário C1 (todas as saídas abertas).

4.2. Análise por Turno

A Figura 5 apresenta, para cada cenário, o TTE médio obtido em cada turno, calculado como média dos quatro regimes de velocidade dentro de um mesmo cenário. Essa abordagem permite comparar o efeito do turno, e portanto da ocupação, mantendo constante a configuração de saídas.

Em todos os cenários, o turno matutino registrou o maior TTE médio, resultado coerente com sua maior ocupação (208 alunos). O turno noturno apresentou consistentemente os menores tempos, com reduções que variaram de 4,9% em relação ao matutino no Cenário C1 — onde todas as saídas estão disponíveis e o efeito da ocupação é amortecido pela distribuição do fluxo — até 32,4% no Cenário C2, onde apenas a saída principal está disponível. Neste último caso, a menor ocupação noturna (90 alunos, exclusivamente do

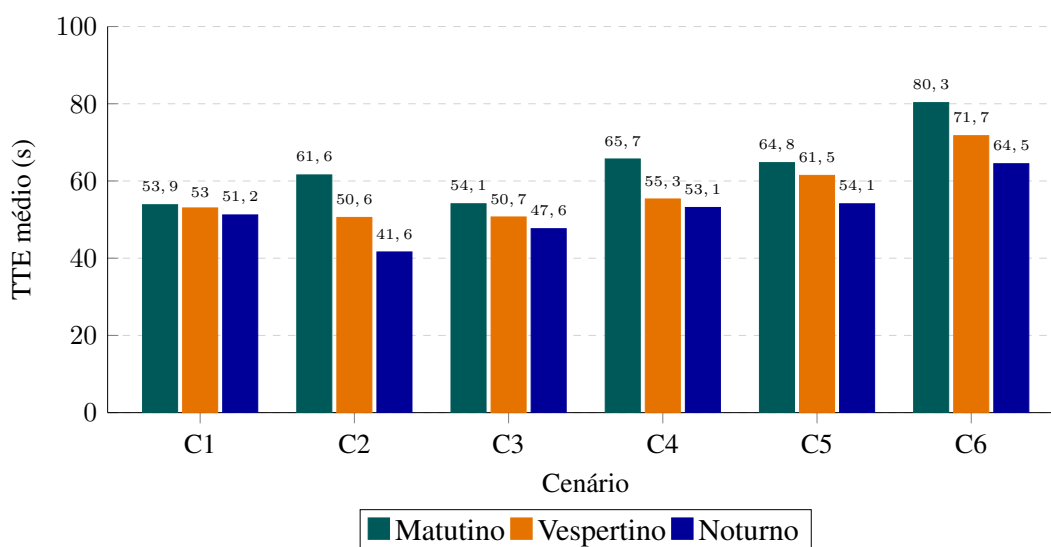


Figura 5. TTE médio por cenário e turno (média dos 4 regimes de velocidade).

Ensino Médio) aliada à concentração dos estudantes em salas próximas à saída principal resultou em tempos consideravelmente menores do que nos demais turnos.

4.3. Análise por Regime de Velocidade

A Figura 6 apresentam o TTE médio por regime de velocidade. A redução do TTE com o aumento da velocidade desejada foi consistente em todos os cenários, com o regime de Pânico apresentando um TTE médio (29,18s) cerca de 70% menor que o regime Normal (96,63s). Este resultado era esperado, uma vez que velocidades mais altas permitem que os agentes percorram as rotas de fuga em menos tempo.

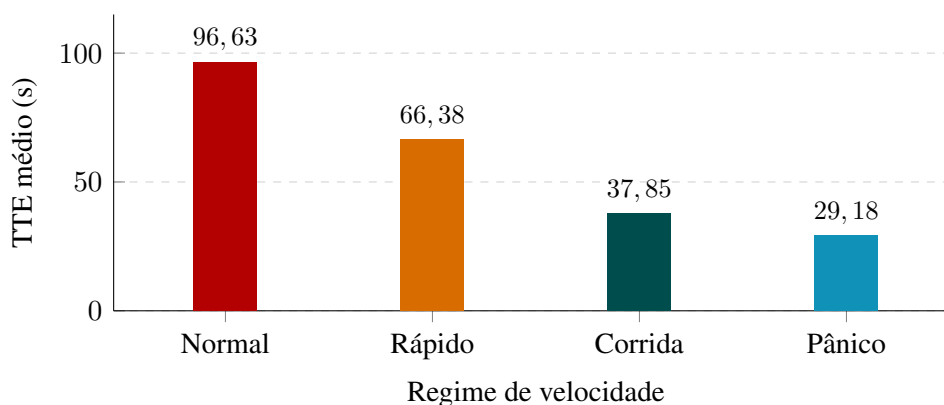


Figura 6. Tempo médio de evacuação por regime de velocidade.

O Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina recomenda que o TTE em estabelecimentos escolares não exceda 3 minutos [Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina 2018]. Todos os cenários simulados atenderam a esse limite, mesmo no pior caso observado (Cenário C6, turno matutino, regime Normal), cujo TTE de 138,07s corresponde a aproximadamente 2 minutos e 18 segundos. Esse resultado indica que a edificação, nas condições simuladas, possui capacidade de evacuação dentro dos parâmetros regulatórios vigentes.

Em nenhuma das combinações avaliadas foi observado o efeito *faster-is-slower*, descrito por [Helbing et al. 2000]. Esse efeito ocorre quando o aumento da velocidade desejada resulta, ao contrário do esperado, em tempos de evacuação maiores, devido a congestionamentos nas saídas. A ausência deste efeito no presente estudo indica que a configuração física da ECIM EEB Walmor Ribeiro, com rotas de fuga relativamente amplas em um único pavimento, não gerou densidades suficientes para desencadear o fenômeno. Este resultado contrasta com simulações em edificações com múltiplos andares e escadas estreitas, como reportado por [Helbing et al. 2000], onde o efeito foi observado. A implicação prática é que, para a escola em estudo, estratégias que incentivem o deslocamento rápido dos ocupantes (como treinamentos periódicos e sinalização clara) tendem a ser eficazes na redução do tempo de saída.

4.4. Análise de Plausibilidade dos Tempos

Com o objetivo de verificar a consistência dos resultados da simulação, foi realizada uma análise de plausibilidade fundamentada em princípios da engenharia de tráfego de pedestres. Considerou-se o cenário mais restritivo e de menor ocupação que resultou em baixo TTE: o turno noturno no Cenário 2 (apenas saída principal), que registrou tempo médio de 22,37s no regime de Pânico.

A estimativa teórica divide o TTE em duas partes: o tempo de caminhamento do agente mais distante até a saída e o tempo de passagem de todos os agentes pelo vão da porta. Para o cálculo, adotou-se a distância de 65 metros entre a sala de aula mais remota e a saída principal, e considerou-se uma população de 24 alunos nessa sala. No regime de Pânico, a velocidade dos estudantes do Ensino Médio é de 4,23 m/s, resultando em um tempo de percurso individual de aproximadamente:

$$t_{\text{percurso}} = \frac{65 \text{ m}}{4,23 \text{ m/s}} \approx 15,4 \text{ s} \quad (1)$$

Para o fluxo pela porta, adotou-se o valor de referência de 1,3 pedestres por segundo por metro de largura de vão, conforme [Nelson and Mowrer 2002]. Considerando uma porta com largura de 1,0 metro, o tempo necessário para a passagem de 24 alunos é:

$$t_{\text{passagem}} = \frac{24 \text{ pedestres}}{1,3 \text{ pedestres/s} \times 1,0 \text{ m}} \approx 18,5 \text{ s} \quad (2)$$

O tempo total estimado, considerando que o primeiro aluno inicia o deslocamento enquanto os demais se aproximam da porta, fica entre 15,4s (limite mínimo) e 33,9s (limite máximo, com passagem sequencial). O valor de 22,37s obtido na simulação está dentro deste intervalo teórico, o que confirma a plausibilidade dos resultados.

Esta estimativa não considera o tempo de reação inicial nem possíveis hesitações. A concordância entre a estimativa teórica e o resultado simulado valida os tempos obtidos e afasta a possibilidade de inconsistências no modelo. Assim, os tempos reduzidos observados em cenários favoráveis, são reflexo das características físicas da edificação e dos parâmetros definidos para os agentes.

Entre todos os cenários avaliados, os tempos simulados variaram de 22,37s (Cenário C2, turno noturno, regime Pânico) a 138,07s (Cenário C6, turno matutino, re-

gime Normal), evidenciando o impacto conjunto das variáveis de cenário, turno e regime de velocidade no TTE.

4.5. Limitações e Trabalhos Futuros

Os resultados apresentados devem ser interpretados considerando algumas limitações. Primeiramente, a simulação considera apenas o tempo de deslocamento dos ocupantes, sem incluir o tempo de reação inicial entre a percepção da emergência e o início da evacuação. Estudos indicam que este tempo de pré-movimento pode variar de dezenas de segundos a vários minutos, dependendo da clareza do alarme, do treinamento dos ocupantes e da percepção do risco. A incorporação de tempos de pré-movimento é uma sugestão de trabalho futuro.

Além disso, não foram modelados fatores ambientais que podem influenciar uma evacuação real, como presença de fumaça, redução da visibilidade, obstáculos temporários (móveis deslocados, escombros) ou comportamentos difíceis de prever dos ocupantes em situação de pânico real. Adicionalmente, as forças de repulsão do SFM não foram calibradas para este estudo nem diferenciadas por perfil de agente, adotando-se os valores padrão do Viswalk. Sugere-se explorar estes aspectos em trabalhos futuros.

Este trabalho não abordou a geração de mapas de calor e curvas de densidade ao longo do tempo. Como os tempos de evacuação se mantiveram reduzidos e não foram observados congestionamentos críticos, tal análise agregaria pouco valor interpretativo aos cenários simulados. Em contextos com maiores densidades ou gargalos mais severos, esses recursos seriam importantes para identificar pontos de estrangulamento. Assim, permanecem como possibilidade para trabalhos futuros, ao lado da modelagem do comportamento de grupos (como turmas lideradas por um professor), da análise de sensibilidade dos parâmetros do SFM e da simulação acoplada de fumaça e fogo.

5. Conclusão

Este trabalho investigou, por meio de simulação baseada em agentes, o processo de evacuação da ECIM EEB Walmor Ribeiro, uma edificação escolar de porte médio localizada em Ibirama-SC. Utilizando a plataforma PTV Vissim com o módulo Viswalk, fundamentado no Social Force Model, foram simulados 6 cenários com diferentes disponibilidades de rotas de fuga, em 3 turnos de ocupação e sob 4 regimes de velocidade dos pedestres, totalizando 72 combinações experimentais.

Os resultados permitiram medir o impacto de cada variável no tempo total de evacuação. O Cenário 6, com apenas a saída dos fundos disponível, foi consistentemente o mais crítico, com tempos que chegaram a 138,07s no pior caso, representando um aumento de 37% em relação ao cenário normal. Foi identificado um resultado relevante no turno noturno, onde concentrar o fluxo em uma única saída (Cenário 2) mostrou-se mais eficiente do que distribuí-lo por múltiplas rotas, um achado que pode orientar a elaboração de planos de evacuação diferenciados por turno. A ausência do efeito *faster-is-slower* indica que as características físicas da escola (térrea, com corredores amplos) não geram congestionamentos críticos. A análise de plausibilidade confirmou que os tempos obtidos são consistentes com a teoria de dinâmica de pedestres, dando credibilidade aos resultados. A simulação computacional demonstrou ser uma ferramenta valiosa para diagnóstico e melhoria da segurança em edificações escolares.

Com base nos achados, recomenda-se à gestão da ECIM EEB Walmor Ribeiro: (i) a instalação de sinalização de emergência fotoluminescente e luzes de balizamento que orientem claramente as rotas de fuga, especialmente em direção às saídas lateral e dos fundos, caso ainda não existam ou não estejam devidamente sinalizadas; (ii) a realização de simulados periódicos de abandono, diferenciados por turno, para que os alunos se familiarizem com as saídas alternativas e com o trajeto até elas; (iii) a afixação, nas salas de aula, de mapas de rota de fuga que indiquem a saída mais próxima, incentivando que cada turma se dirija sempre para a saída adequada à sua localização, reduzindo deslocamentos; e (iv) a elaboração de um plano de contingência específico para cada turno, levando em conta a distribuição espacial distinta dos estudantes no período noturno.

Referências

- Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99:7280–7287.
- Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (2018). *Instrução Normativa IN-007: Saídas de Emergência*. CBMSC, Florianópolis.
- Frare, F. (2024). *Simulação de Evacuação de Emergência no Bloco Imbuia da UDESC Utilizando PTV Vissim/Viswalk*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC).
- Helbing, D., Farkas, I., and Vicsek, T. (2000). Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407(6803):487–490.
- Helbing, D. and Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 51(5):4282–4286.
- Nelson, H. E. and Mowrer, F. W. (2002). Emergency movement. In Dinunno, P. J. and Walton, W. D., editors, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, page 367. National Fire Protection Association, Quincy, MA, 3rd edition.
- Predtechenskii, V. M. and Milinskii, A. I. (1978). *Planning for Foot Traffic Flow in Buildings*. Amerind Publishing.
- PTV Group (2024). PTV Viswalk – pedestrian simulation software. <https://www.ptvgroup.com/en/products/pedestrian-simulation-software-ptv-viswalk>.
- Silva, V. M. et al. (2017). Simulação multiagente da evacuação da boate kiss: A importância da nbr 9.077 e sua relação com o 'pânico'. In *Anais do Workshop-Escola de Sistemas de Agentes, seus Ambientes e aplicações (WESAAC)*, pages 1–10. SBC.
- Simeunović, M., Tanackov, I., Pitka, P., et al. (2021). Determination of moving speed of school age children. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021(1):9965753.
- Tsai, J. et al. (2011). ESCAPES: Evacuation simulation with children, authorities, parents, emotions, and social comparison. In *Proceedings of the 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, pages 457–464. IFAAMAS.
- Weidmann, U. (1993). *Transporttechnik der Fussgänger: Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs*. ETH Zürich.