

Estudo de Simulação de Sistemas de Contenção de Águas no Rio Grande do Sul para Prevenção de Enchentes

Daniel Martins Leal, Gabriel Rezende, Rilbert Santos,
Valdemar Vicente Graciano Neto

¹Instituto de Informática – Universidade Federal de Goiás (UFG)
Alameda Palmeiras, s/n - Chácara Califórnia, Goiânia - GO - Brazil

daniel.mleal1@gmail.com, {gabrielcmrezende, rilbert}@discente.ufg.br,
valdemarneto@ufg.br

Abstract. *This paper addresses the simulation of emergency situations related to the flood protection system in Porto Alegre. Urban floods, caused by intense rains exceeding drainage capacity, result in significant material damage and severe social and economic impacts. The study focuses on Porto Alegre's vulnerability, situated in the Rio Guaíba basin, where heavy rains frequently cause overflows. Maintenance issues and technological obsolescence undermine the protection systems' effectiveness. The methodology uses system-based simulation and DEVS, implemented with SimPy in Python, to model and evaluate the protection system, identify vulnerabilities, and propose improvements.*

Resumo. *Este artigo aborda a simulação de situações de emergência relacionadas ao sistema de proteção contra enchentes de Porto Alegre. As enchentes urbanas, causadas por chuvas intensas que excedem a capacidade de drenagem, resultam em danos materiais e impactos sociais e econômicos severos. O estudo foca na vulnerabilidade de Porto Alegre, situada na bacia do Rio Guaíba, onde chuvas intensas frequentemente causam transbordamentos. Problemas de manutenção e obsolescência tecnológica comprometem a eficácia dos sistemas de proteção. A metodologia utiliza simulação baseada em sistemas e DEVS, implementados com SimPy em Python, para modelar e avaliar o sistema de proteção, identificar vulnerabilidades e propor melhorias.*

1. Introdução

As enchentes em áreas urbanas são fenômenos recorrentes que ocorrem quando o volume de água de chuvas intensas excede a capacidade de absorção do solo e do sistema de drenagem. Além de causar danos materiais significativos, como a destruição de infraestruturas e propriedades, as enchentes urbanas também apresentam graves consequências sociais e econômicas, incluindo o deslocamento de populações, interrupção de serviços essenciais e impactos negativos na saúde pública. Enchentes decorrentes de um alto volume de chuvas em afluentes de uma bacia hidrográfica, como a do Rio Guaíba, também são comuns e podem ter consequências severas para as cidades que circundam essas bacias. O Rio Guaíba, que recebe águas de diversos afluentes, frequentemente experimenta elevações significativas de seu nível durante períodos de chuvas intensas, levando a transbordamentos e inundações nas áreas adjacentes. As cidades localizadas ao longo dessa

bacia, como Porto Alegre, são particularmente vulneráveis, enfrentando inundações que afetam residências, comércios e infraestruturas críticas [Monte et al. 2022].

A convergência de massas de ar e a formação de corredores de umidade podem intensificar as chuvas sobre a bacia, exacerbando as enchentes. A falta de manutenção adequada dos sistemas de contenção e drenagem, junto com a obsolescência tecnológica desses sistemas, agrava a situação. Portanto, é vital a implementação de estratégias de mitigação, como a modernização dos sistemas de controle de enchentes, a realização de simulações regulares de cenários de inundação e a promoção de treinamentos para as equipes de emergência [Zeigler et al. 2013]. Investimentos em infraestrutura e a adoção de práticas sustentáveis no planejamento urbano são cruciais para aumentar a resiliência das cidades circundantes às bacias hidrográficas e minimizar os impactos das enchentes.

As enchentes de maio de 2024 na Região Sul do Brasil, particularmente no Rio Grande do Sul, marcaram um evento climático de proporções inéditas, superando todos os registros históricos desde o início das medições. Causadas por uma rara convergência de massas de ar que formou um corredor de umidade persistente, as chuvas torrenciais castigaram a região serrana e os afluentes do Vale do Taquari, levando ao transbordamento do Rio Guaíba e inundando áreas extensas da região metropolitana de Porto Alegre.

Embora a região já possuísse um sistema de proteção contra enchentes implementado há décadas, diversos fatores contribuíram para a falha do sistema e o agravamento da tragédia, tais como (i) **Manutenção Inadequada:** A negligência na manutenção preventiva e corretiva dos diques, comportas, casas de bombas e muros de contenção ao longo dos anos comprometeram a integridade estrutural do sistema, tornando-o vulnerável às fortes chuvas; (ii) **Falta de Testes e Atualizações:** A ausência de testes regulares e simulações de cenários de inundação impediu a identificação precoce de falhas e pontos críticos no sistema. Soma-se a isso a falta de treinamento adequado das equipes de emergência e a defasagem dos protocolos de resposta, que contribuíram para uma reação ineficaz durante o evento e (iii) **Obsolescência Tecnológica:** O sistema de proteção, projetado e implementado há décadas, não acompanhou a evolução tecnológica. A integração de novas metodologias de monitoramento e controle, como sensores avançados e sistemas de previsão meteorológica mais precisos, poderia ter aumentado significativamente a resiliência do sistema [Zeigler et al. 2013].

As falhas no sistema de proteção contra enchentes tiveram consequências devastadoras para a região metropolitana de Porto Alegre, tais como **Inundações Extensas**, com áreas residenciais, comerciais e industriais sofrerem inundações de grande escala, causando danos materiais consideráveis e impactando a vida de milhares de pessoas; **Prejuízos à Infraestrutura**, com Pontes, estradas e outras infraestruturas essenciais foram severamente afetadas, dificultando o acesso e a locomoção na região, além de comprometer o fornecimento de serviços básicos; e **Impactos Sociais e Econômicos**, com enchentes causando deslocamentos, perdas de renda, abalos na economia local e traumas psicológicos na população.

Este artigo tem como objetivo analisar e simular os sistemas de contenção de águas no Rio Grande do Sul, focando na vulnerabilidade de Porto Alegre e propondo melhorias para o sistema de proteção contra enchentes. Por se tratar de um sistema mecânico, este artigo tem o propósito de explorar, via simulações, como mecanismos

de automação baseados em software poderiam auxiliar na contenção dos problemas que aconteceram, explorando simulação de software como outros trabalhos anteriores deste mesmo fórum [França and Graciano Neto 2021, Pedro et al. 2023]. O artigo está organizado da seguinte forma: A Seção 2 traz um breve referencial teórico, a Seção 3 apresenta a solução concebida e discussão, e a Seção 4 conclui o artigo.

2. Referencial Teórico

DEVS (*Discrete Event System Specification*) é um formalismo para a modelagem e simulação (M&S) de sistemas discretos. Ele fornece uma estrutura rigorosa para definir e analisar o comportamento de sistemas compostos por componentes interativos. DEVS facilita a descrição precisa do comportamento dos componentes do sistema e suas interações. Este formalismo é amplamente utilizado em diversos campos devido à sua capacidade de lidar com a complexidade e a natureza discreta de muitos sistemas reais [Zeigler et al. 2000, Graciano Neto and Kassab 2023].

Por sua vez, SimPy é uma biblioteca de simulação de eventos discretos em Python que fornece uma estrutura robusta para a implementação de modelos DEVS. O SimPy permite a criação de processos que podem interagir de forma complexa, replicando a dinâmica do sistema de proteção contra enchentes. A biblioteca oferece uma série de ferramentas que facilitam a modelagem, a simulação e a análise de sistemas complexos, tornando-a ideal para este tipo de estudo [Zeigler et al. 2013]. Matplotlib é uma biblioteca de visualização de dados em Python, especialmente útil em simulações científicas por sua capacidade de gerar gráficos de alta qualidade e personalizáveis. A biblioteca facilita a análise visual de dados complexos e se integra bem com outras ferramentas científicas em Python, tornando-a simples e coesa. Sua flexibilidade e a extensa documentação suportam uma variedade de necessidades de visualização [Hunter 2007].

Outros trabalhos anteriores já investiram em simulação ou monitoramento de enchentes [Horita et al. 2014, Graciano Neto et al. 2017, Luo et al. 2022, Degrossi and de Albuquerque 2014]; no entanto, os autores não têm ciência de outros trabalhos que simulem o que aconteceu no Rio Grande do Sul no ano de 2024.

3. Modelo de Simulação para as Enchentes no Rio Grande do Sul

Para realizar a simulação dos sistemas de contenção de águas e a gestão das comportas no contexto de prevenção de enchentes, utilizou-se o formalismo DEVS, implementado com a biblioteca SimPy em Python. O código está disponível em um repositório externo para consulta¹. O modelo de simulação foi configurado com um conjunto de constantes que definem os parâmetros principais da simulação. Estas incluem o intervalo de leitura da profundidade do rio, o número de comportas, a taxa de sucesso das operações das comportas e o número de execuções da simulação. As constantes são definidas da seguinte forma: INTERVALO_LEITURA, que define o intervalo de leitura da profundidade do rio como 5 segundos; NUM_COMPORTAS, que define o número de comportas no sistema como 19; TAXA_SUCESSO, que define a taxa de sucesso para o funcionamento das comportas como 0.9 (90%); e NUM_EXECUCOES, que define o número de execuções da simulação como 10.

¹<https://ww2.inf.ufg.br/~valdemarneto/projects/enchentesRS.html>

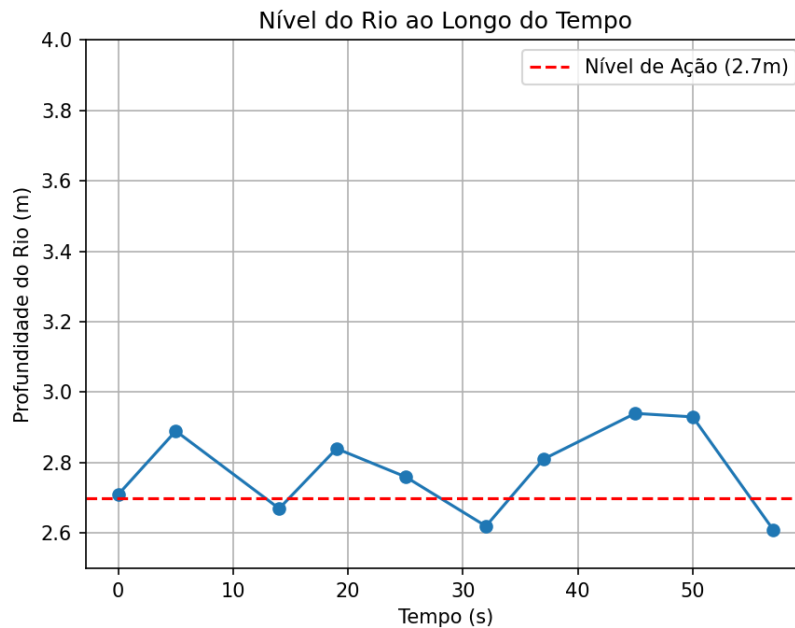


Figure 1. Nível do Rio ao Longo do Tempo

O modelo implementa várias funções principais para simular a leitura da profundidade do rio, a central de controle, a gestão das comportas e a manutenção das mesmas. A função `leitor_profundidade()` simula a leitura da profundidade do rio, retornando um valor aleatório entre 2.5 e 3.0 metros. A função `central(env, profundidade)` simula a central de controle que recebe a profundidade do rio e decide se deve enviar uma ordem de fechamento das comportas. Se a profundidade for igual ou superior a 2.7 metros, uma ordem de fechamento é enviada. Caso contrário, nenhuma ação é tomada. A função `gerenciar_comportas(env, profundidade)` simula o processo de fechamento das comportas e a verificação de falhas. Para cada comporta, é realizada uma verificação aleatória para determinar se a operação de fechamento foi bem-sucedida. Em caso de falha, é iniciada uma simulação de manutenção. A função `manutencao(env, comporta_id, profundidade)` simula a manutenção e correção de uma comporta que falhou. Este processo inclui um período de espera para representar o tempo necessário para realizar a manutenção. A função `simular(env)` coordena a execução da simulação, realizando múltiplas leituras da profundidade do rio e acionando a central de controle conforme necessário. As profundidades lidas e as ações tomadas são armazenadas para posterior análise.

A simulação é executada dentro de um ambiente SimPy, onde as funções descritas anteriormente são processadas. Para visualizar os resultados da simulação, são gerados dois gráficos: um para o nível do rio ao longo do tempo e outro para o comportamento das comportas. O gráfico de nível do rio ao longo do tempo mostra as leituras da profundidade do rio e indica o nível de ação (2.7 metros) com uma linha tracejada vermelha. O gráfico de comportamento das comportas ao longo do tempo mostra os eventos de fechamento bem-sucedido das comportas, falhas e manutenções realizadas. Durante a simulação, a profundidade do rio é lida periodicamente e, se a profundidade atingir ou exceder 2.7

metros, a central de controle envia uma ordem de fechamento para as comportas. Cada comporta tem uma probabilidade de 90% de fechar com sucesso. Se uma comporta falhar ao fechar, é iniciada uma simulação de manutenção que corrige a falha e retoma a operação normal. As ações tomadas, incluindo leituras da profundidade, fechamentos bem-sucedidos, falhas e manutenções, são registradas e plotadas para análise.

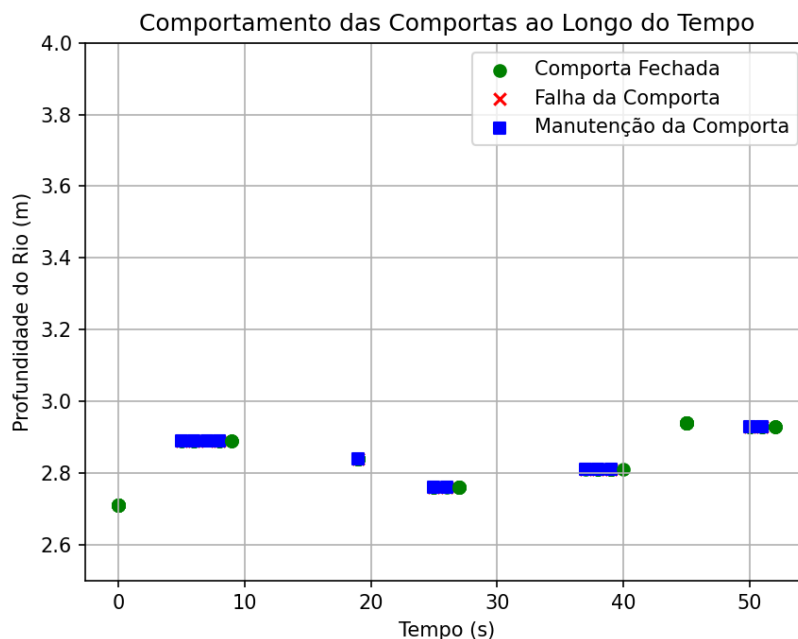


Figure 2. Comportamento das Comportas ao Longo do Tempo

A metodologia descrita neste trabalho demonstra a aplicação eficaz de simulação baseada em sistemas e formalismo DEVS para a gestão de sistemas de contenção de águas. O uso da biblioteca SimPy em Python facilita a implementação e a visualização dos resultados, permitindo uma análise detalhada e a identificação de áreas para melhoria contínua. A análise dos resultados permite compreender a eficácia do sistema de contenção de águas e identificar possíveis falhas e a necessidade de manutenção das comportas. A simulação fornece indicadores valiosos sobre o comportamento do sistema sob diferentes condições, contribuindo para a melhoria das estratégias de prevenção de enchentes.

Resultados e Discussão. Os resultados da simulação destacam a importância de um programa contínuo de manutenção e monitoramento para a eficácia dos sistemas de proteção contra enchentes. A análise dos dados mostra que a taxa de sucesso de 90% das comportas é geralmente eficaz, mas as falhas ocasionais requerem um sistema de manutenção rápida e eficiente. Durante os testes, a profundidade do rio frequentemente alcançou níveis críticos, desencadeando a necessidade de fechar as comportas. A simulação mostrou que, mesmo com um alto nível de sucesso nas operações das comportas, a falha de uma única comporta pode ter consequências significativas, enfatizando a necessidade de manutenção e monitoramento constantes.

A implementação de treinamentos regulares para as equipes responsáveis pela operação do sistema é crucial. Estes treinamentos devem incluir simulações de cenários de falha para garantir que as equipes possam responder de forma eficaz a eventos imprevistos. Além disso, a integração de tecnologias modernas, como sensores em tempo real e sistemas de previsão meteorológica avançados, pode aumentar significativamente a resiliência do sistema, permitindo respostas mais rápidas e precisas às condições de enchente.

É evidente que o sistema atual, embora robusto em seu projeto, falhou em sua execução devido à falta de manutenção e atualizações tecnológicas. O manifesto ressalta que a negligência na manutenção das comportas e das casas de bombas, aliada à falta de modernização do sistema, são os principais culpados pelas inundações recentes. A proposta de medidas emergenciais, como a vedação das comportas e a utilização de bombas volantes, é crucial para enfrentar a crise atual. No entanto, para garantir a eficácia a longo prazo, é necessário implementar um programa de manutenção rigoroso e contínuo, além de investir em novas tecnologias de monitoramento e controle [Espindula 2024].

A análise dos resultados da simulação reflete as recomendações do manifesto ao destacar a necessidade de uma abordagem proativa na manutenção e atualização do sistema de proteção contra enchentes. A modernização das infraestruturas existentes, aliada à capacitação contínua das equipes operacionais, pode mitigar significativamente os riscos de futuras inundações. A criação de um fundo permanente para garantir a disponibilidade de recursos financeiros para a manutenção e atualização do sistema é recomendada para assegurar a continuidade das operações de prevenção de enchentes.

Além disso, programas de educação e conscientização para a população sobre os riscos de enchentes e as medidas de prevenção podem ajudar a criar uma cultura de prevenção de desastres. A população informada está melhor preparada para tomar ações apropriadas durante eventos de enchente, contribuindo para a eficácia geral do sistema de proteção.

4. Conclusão

A simulação baseada em sistemas e DEVS, implementada com SimPy, forneceu uma visão detalhada do funcionamento do sistema de proteção contra enchentes de Porto Alegre. Através da análise dos resultados, foi possível identificar pontos críticos e propor melhorias que podem aumentar a eficácia do sistema, garantindo maior segurança para a população. Investimentos em tecnologia e infraestrutura, aliados a um programa contínuo de manutenção e treinamento, são essenciais para enfrentar eventos climáticos extremos de maneira eficaz.

Os pontos levantados pelo manifesto de especialistas reforçam as conclusões deste estudo, ressaltando a importância de uma abordagem integrada que combina manutenção rigorosa, modernização tecnológica e educação da população [Espindula 2024]. Para que Porto Alegre possa se proteger de futuros eventos de enchente, é necessário um compromisso contínuo com a melhoria e atualização de seu sistema de proteção contra inundações, incluindo o emprego de simulações e automação via software [Graciano Neto et al. 2019, Abreu et al. 2011].

References

- Abreu, C. G., Coelho, C. G. C., Ralha, C. G., Zaghetto, A., and Macchiavello, B. (2011). Ferramenta de simulação com abordagem de sistema multiagente híbrida para gestão ambiental. *iSys-Brazilian Journal of Information Systems*, 4.
- Degrossi, L. C. and de Albuquerque, J. P. (2014). Observatório Cidadão de Enchentes (OCE): uma plataforma de crowdsourcing para obtenção de VGI no contexto de gestão de risco de inundação. In *Anais do X SBSI*, pages 256–267, Londrina. SBC.
- Espindula, T. e. a. (2024). Manifesto de especialistas sobre as enchentes em porto alegre. Accessed: 2024-05-19.
- França, B. and Graciano Neto, V. V. (2021). Opportunities for simulation in software engineering. In *Anais do III MSSiS*, pages 50–54, Joinville, Brasil. SBC.
- Graciano Neto, V. V., de Barros Paes, C. E., Rodriguez, L. M. G., Guessi, M., Manzano, W., Oquendo, F., and Nakagawa, E. Y. (2017). Stimuli-sos: a model-based approach to derive stimuli generators for simulations of systems-of-systems software architectures. *J. Braz. Comput. Soc.*, 23(1):13:1–13:22.
- Graciano Neto, V. V., Horita, F. E. A., Santos, R., Viana, D., Kassab, M., Manzano, W., and Nakagawa, E. Y. (2019). S.O.B (Save Our Budget) - A Simulation-Based Method for Prediction of Acquisition Costs of Constituents of a System-of-Systems. *iSys - Brazilian Journal of Information Systems*, 12(4):6–35.
- Graciano Neto, V. V. and Kassab, M. (2023). *What Every Engineer Should Know About Smart Cities*. CRC Press.
- Horita, F. E. A., Fava, M. C., Mendiondo, E. M., Rotava, J., de Souza, V. C. B., Ueyama, J., and de Albuquerque, J. P. (2014). Agora-geodash: A geosensor dashboard for real-time flood risk monitoring. In Hiltz, S. R., Plotnick, L., Pfaf, M., and Shih, P. C., editors, *11th ISCRAM*. ISCRAM Association.
- Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2d graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3):90–95.
- Luo, P., Luo, M., Li, F., Qi, X., Huo, A., Wang, Z., He, B., Takara, K., Nover, D., and Wang, Y. (2022). Urban flood numerical simulation: Research, methods and future perspectives. *Environmental Modelling & Software*, 156:105478.
- Monte, B. E. O., Tschiedel, A. d. F., Silva, D. F. d., Goldenfum, J. A., and Dornelles, F. (2022). Implicações da ausência de dispositivos de proteção na área urbana de porto alegre: análise da cheia de 1941. *XII Encontro Nacional de Águas Urbanas*, pages 1–10.
- Pedro, R., Bulcão-Neto, R., Coutinho, E., and Neto, V. G. (2023). Uma análise do workshop de modelagem e simulação em sistemas intensivos de software. In *Anais do V MSSiS*, pages 1–10, Campo Grande/MS. SBC.
- Zeigler, B. P., Kim, T. G., and Praehofer, H. (2000). *Theory of Modeling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Systems*. Academic Press, San Diego, CA.
- Zeigler, B. P., Sarjoughian, H. S., Duboz, R., and Soulie, J.-C. (2013). *Guide to modeling and simulation of systems of systems*. Springer.