

MAPE-KV: Una Arquitectura Neuro-Simbólica Verificada para la Orquestación de Enjambres Robóticos

Daniel Narváez^{1,3}, Néstor Balich¹, Gustavo Rossi^{1,2}

¹CAETI – Universidad Abierta Interamericana (UAI) – Facultad de Tecnología Informática
C1270AAH – Buenos Aires – Argentina

²LIFIA, Facultad de Informática – Universidad Nacional de La Plata (UNLP)
1900 – La Plata – Argentina

³Área de Ciencias Básicas y Tecnología – Universidad Nacional Politécnica (UNP)
47000 – Rivas – Nicaragua

josedaniel.narvaezf@alumnos.uai.edu.ar, nestor.balich@uai.edu.ar

gustavo@lifia.info.unlp.edu.ar

Abstract. *Robotic swarm orchestration in the Edge–Cloud Continuum increasingly depends on adaptive planning, yet the use of LLMs introduces stochastic risk into safety-critical cyber-physical systems. We present MAPE-KV, an extension of the MAPE-K loop that inserts a formal verification gate in Lean 4 between planning and execution. The proposal aims to block unsafe plans ante hoc through explicit physical-safety and software-quality invariants. A preliminary proof of concept in the Ester Grid simulator with five robots showed that, in the evaluated scenario, the gate intercepted all unsafe plans observed before execution. This work should be read as an architectural proposal with initial feasibility evidence, not as exhaustive experimental validation.*

Keywords: *Formal Verification, Robotic Swarms, Lean 4, LLMs, MAPE-K, Neuro-symbolic AI.*

1. Introducción

La convergencia entre robótica de enjambre, continuo Edge–Cloud y GenAI redefine la autonomía industrial, pero también introduce un problema central: un LLM puede generar planes plausibles y peligrosos en ejecución [Zhu et al. 2025, Ahn et al. 2025]. En sistemas ciberfísicos, esto puede derivar en colisiones o pérdida de conectividad. Aunque existen enfoques probabilísticos para mitigar este riesgo [Obi et al. 2025], sigue abierta la pregunta de cómo insertar una compuerta determinista dentro del ciclo autónomo para impedir que planes inseguros alcancen la ejecución física. En respuesta, proponemos MAPE-KV, una extensión de MAPE-K con verificación formal ejecutable en Lean 4 [Iglesia and Weyns 2015, Moura and Ullrich 2021]. La contribución principal de este trabajo es arquitectónica: proponer y ejemplificar una extensión verificable del bucle MAPE-K que integra planificación generativa y validación formal *ante-hoc* para sistemas ciberfísicos críticos.

2. MAPE-KV

MAPE-KV inserta una fase explícita de **Verify** entre *Plan* y *Execute*. El planificador produce un plan ejecutable π y un artefacto formal ρ ; luego, Lean 4 valida ρ antes del despliegue. Si la verificación falla, el sistema devuelve diagnósticos para refinar la propuesta. Así, Lean 4 actúa como un “cortafuegos lógico” *ante-hoc*. La

base *Robotics.Lean* codifica dos grupos de invariantes. En el plano físico, formaliza distancia segura y no-colisión [Wang et al. 2016]. En el plano de software, incorpora restricciones de acoplamiento para evitar adaptaciones arquitectónicamente frágiles [Al-Debagy and Martinek 2020, Narváez et al. 2025a]. La propuesta se conecta además con nuestra línea previa sobre arquitecturas neuro-simbólicas verificadas aplicadas al diseño de software [Narváez et al. 2025b].

3. PoC Preliminar

Para obtener evidencia inicial de viabilidad, implementamos una prueba de concepto en Ester Grid con un enjambre de $N = 5$ robots en un escenario bidimensional acotado. La PoC se diseñó para estresar la compuerta de verificación frente a planes potencialmente inseguros. El componente *Verify* impuso cuatro restricciones: distancia mínima $D_{SAFE} = 5$, conectividad local con radio $D_{MAX} = 200$, redundancia topológica mínima ($k \geq 2$) y límite dinámico de acoplamiento ($MAX_{CBO} \leq 5$). En el escenario evaluado, la compuerta interceptó todos los planes inseguros observados, incluyendo trayectorias que violaban no-colisión o fragmentaban la topología de red, evitando su ejecución física. Este resultado aporta evidencia preliminar de factibilidad, pero no constituye una validación exhaustiva: aún no reportamos análisis estadísticos, líneas base, distribución de latencias, escalabilidad ni integración robusta extremo a extremo con un LLM generando pruebas formales. Las garantías del sistema dependen de la cobertura de las invariantes formalizadas; por ello, restricciones no modeladas permanecen fuera del alcance de la compuerta actual. En ese sentido, MAPE-KV desplaza el énfasis desde la explicabilidad *post-hoc* hacia la verificación *ante-hoc*, pero todavía requiere evaluación más amplia en tiempo real y a mayor escala.

Referencias

- Ahn, S., Choi, W., Lee, J., Park, J., and Woo, H. (2025). Towards reliable code-as-policies: A neuro-symbolic framework for embodied task planning. *arXiv preprint arXiv:2510.21302*.
- Al-Debagy, O. and Martinek, P. (2020). A metrics framework for evaluating microservices architecture designs. *Journal of Web Engineering*, 19(3–4):341–370.
- Iglesia, D. G. D. L. and Weyns, D. (2015). Mape-k formal templates to rigorously design behaviors for self-adaptive systems. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems (TAAS)*, 10(3):1–31.
- Moura, L. d. and Ullrich, S. (2021). The lean 4 theorem prover and programming language. In *International Conference on Automated Deduction*, pages 625–635. Springer.
- Narváez, D., Battaglia, N., Fernández, A., and Rossi, G. (2025a). Descubrimiento automático de microservicios mediante modelos generativos y verificación formal. In *XXXI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC) (Viedma, 6 al 10 de octubre de 2025)*, Viedma, Argentina. Universidad Nacional de Río Negro (UNRN).
- Narváez, D., Battaglia, N., Fernández, A., and Rossi, G. (2025b). Designing microservices using ai: A systematic literature review. *Software*, 4(1):6.
- Obi, I., Venkatesh, V. L., Wang, W., Wang, R., Suh, D., Amosa, T. I., Jo, W., and Min, B.-C. (2025). Safeplan: Leveraging formal logic and chain-of-thought reasoning for enhanced safety in llm-based robotic task planning. *arXiv preprint arXiv:2503.06892*.
- Wang, L., Ames, A., and Egerstedt, M. (2016). Safety barrier certificates for heterogeneous multi-robot systems. In *2016 American control conference (ACC)*, pages 5213–5218. IEEE.
- Zhu, H., Samizadeh, T., and Sofia, R. C. (2025). A codeco case study and initial validation for edge orchestration of autonomous mobile robots. *arXiv preprint arXiv:2511.08354*.