

A submissão dos artigos deve ser realizada em duas etapas:

Etapa 1: Inicialmente, o artigo tem que ser submetido somente com as seguintes informações na primeira página: título (**sem informação dos autores**), resumo com palavras-chave (português), tópico do artigo (caso tenha mais de um colocá-los em ordem de prioridade), *abstract* com *keywords* e *paper topics* (inglês). O texto completo do trabalho deve vir a partir da segunda página.

Etapa 2: Após passar pelos avaliadores e os autores receberem a respectiva carta de aceitação, o autor deverá retornar ao sistema de submissão e fazer novo "upload" com a **versão final** do artigo que deverá ser completo, ou seja, o autor deverá recolocar as informações da primeira página que foram retiradas na primeira etapa da submissão:

1. primeira página – título; nome, filiação/endereço e e-mail de cada um dos autores; resumo com palavras-chave, tópico do artigo (caso tenha mais de um colocá-los em ordem de prioridade) (português) e *abstract* com *keywords* e *paper topics* (inglês)
2. segunda página - o texto completo do artigo (como na versão inicial).

O modelo pré-formatado abaixo tem como objetivo ajudar os autores na formatação correta solicitada com relação a tamanho de página, margens, fontes e respectivos tamanhos, espaçamento, etc.

PROPOSTA DE FRAMEWORK PARA O DESENVOLVIMENTO DE AGENTE DE IA PARA TOMADA DE DECISÃO EM INSPEÇÕES DE TORRES DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA UTILIZANDO DRONES

Cristiano Konrad¹, Francisco G. Fabrin², André Schnorr³, Dion L. P. Feil⁴, Daniel Pinheiro Bernardon⁵, Vinicius Jacques Garcia⁶, Laura L. C. dos Santos⁷

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria, RS, Brasil

¹ckonrad@inf.ufsm.br, ²francisco.fabrin@acad.ufsm.br, ³andre.schnorr@acad.ufsm.br,
⁴dion.feil@ufsm.br, ⁵dpbernardon@ufsm.br, ⁶viniciusjg@ufsm.br, ⁷laura.santos@ufsm.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um framework para otimização de inspeções em linhas de transmissão de energia elétrica através de um agente de Inteligência Artificial (IA) capaz de tomar decisões autônomas diante de adversidades operacionais. Apesar dos avanços em tecnologias de inspeção, a literatura carece de soluções robustas para adaptação em tempo real de rotas quando surgem obstáculos inesperados, condições climáticas adversas ou falhas técnicas. O framework proposto combina um banco de heurísticas, monitoramento contínuo de parâmetros operacionais e um motor de decisão para avaliação de viabilidade e seleção de estratégias apropriadas. Os resultados incluem um fluxograma operacional detalhado do processo decisório. A metodologia baseada em *Design Science Research* (DSR) estabeleceu a arquitetura modular do sistema, fornecendo as bases para implementações práticas com interfaces e protocolos.

PALAVRAS CHAVE. Agente de Inteligência Artificial; Otimização de Rotas de Inspeção; Torres de Transmissão.

ABSTRACT

This work presents a framework proposal for the optimization of inspections in electric power transmission lines through an Artificial Intelligence (AI) agent capable of making autonomous decisions in the face of operational adversities. Despite advancements in inspection technologies, the literature lacks robust solutions for the real-time adaptation of routes when unexpected obstacles, adverse weather conditions, or technical failures arise. The proposed framework combines a heuristics bank, continuous monitoring of operational parameters, and a decision engine for feasibility assessment and selection of appropriate strategies. The results include a detailed flowchart of the decision-making process. The methodology based on Design Science Research established the modular architecture of the system, providing the foundations for practical implementations with well-defined interfaces and protocols.

KEYWORDS. Artificial Intelligence Agent, Inspection Route Optimization, Transmission Towers.

Paper topics (indicate in order of PRIORITY the paper topic(s))

1. Introdução

A inspeção de torres de transmissão de energia elétrica, conforme [ANEEL 2020], é uma atividade crítica para garantir a integridade e funcionamento contínuo do sistema elétrico. Tradicionalmente, essas inspeções envolvem o deslocamento de equipes técnicas ou o uso de aeronaves tripuladas, percorrendo extensas redes de transmissão que frequentemente cobrem terrenos de difícil acesso e condições adversas. Tais operações demandam planejamento logístico complexo, alto consumo de recursos e tempo considerável para execução completa, além de apresentarem riscos operacionais significativos.

Com o desenvolvimento de tecnologias como drones e sistemas de informação geográfica (GIS), surgem novas possibilidades emergiram para otimizar estas inspeções. No entanto, a simples adoção destas tecnologias, sem uma abordagem estruturada para tomada de decisão, pode resultar em ineficiências operacionais e subutilização do potencial disponível, bem como desobedecer a legislação vigente para inspeção [ANAC 2022].

Este trabalho propõe um framework para o desenvolvimento de um agente de inteligência artificial (IA) dedicado à tomada de decisão em inspeções de torres de transmissão. Este framework será capaz de integrar um banco de dados centralizado de heurísticas para otimização de rotas com mecanismos adaptativos para monitoramento e reação a adversidades encontradas durante as operações de inspeção. O agente proposto visa ir além da simples execução de rotas otimizadas, incorporando capacidades de análise contextual e adaptação em tempo real, focando-se em maximizar a eficiência e eficácia das inspeções mesmo em cenários desafiadores. Este trabalho assume que o banco de heurísticas poderá conter heurísticas competitivas, colaborativas, individuais, [Martí, R. et al. 2018], ou seja, não entrará na implementação e desenvolvimento das mesmas.

Um dos aspectos inovadores do framework proposto é sua capacidade de gerenciar o ciclo completo da inspeção: desde a seleção inicial da rota otimizada a partir do banco de heurísticas, passando pelo monitoramento contínuo durante a execução, até a tomada de decisão adaptativa quando confrontado com adversidades operacionais. O agente de IA atua como um copiloto inteligente, capaz de decidir sobre a viabilidade de prosseguir com a inspeção, recalcular rotas dinamicamente com base em restrições de tempo e autonomia, e priorizar a inspeção completa de torres em detrimento de inspeções parciais que comprometem a qualidade dos dados coletados.

Este trabalho apresenta uma breve revisão da literatura, bem como a arquitetura do framework proposto e a metodologia para seu desenvolvimento, explorando seus potenciais benefícios em termos de resiliência operacional, otimização de recursos e aprimoramento da capacidade de decisão autônoma em missões de inspeção de infraestrutura elétrica.

2. Revisão bibliográfica

A revisão da literatura possibilitou identificar potenciais soluções para monitoramento e inspeção de linhas de transmissão de energia utilizando aeronaves não tripuladas. Uma solução possível, conforme [Odo et al., 2021] é a manutenção ponto a ponto utilizando uma unidade móvel equipada com drone. Ao chegar em cada ponto de distribuição, o drone realiza o diagnóstico em tempo real da torre de transmissão de energia. Após receber um diagnóstico, são tomadas decisões para realizar os reparos necessários.

Outra solução possível, segundo [Menendez et al. 2019; Fujun D. et al. 2022], é enviar drones para detectar antecipadamente problemas de manutenção nas torres. As unidades de drones enviam dados em tempo real para a empresa, que organiza rapidamente a logística e a equipe responsável para otimizar os esforços de manutenção nos campos elétricos.

Contudo, a implementação destas soluções apresenta desafios significativos na arquitetura de sistemas. Conforme [Pressman 2021], garantir a coerência dos dados entre componentes de um sistema distribuído, como heurísticas de cálculo de rotas, é um dos maiores desafios em engenharia de software. O autor enfatiza que a ausência de uma arquitetura bem definida pode resultar em replicação desnecessária de informações, gerando custos elevados de

processamento e armazenamento, particularmente críticos em sistemas embarcados com recursos limitados como os presentes em drones.

Ainda, conforme [Sommerville 2019], observa-se que a falta de centralização de dados ou de um ponto único de verdade pode levar à criação de silos de informações, prejudicando a eficiência do sistema como um todo. O autor argumenta que o uso de *Application Programming Interface* (APIs) pode ser eficaz para encapsular lógica e dados, mas somente quando implementadas dentro de uma arquitetura orientada a serviços (SOA). Esta abordagem garante que diferentes heurísticas acessem os mesmos dados de maneira padronizada, mantendo a consistência dos dados e facilitando a integração entre os diversos componentes do sistema.

A análise da literatura permite identificar a necessidade de uma abordagem que integre as vantagens das soluções existentes, bem como combinando o monitoramento em tempo real com a capacidade de tomada de decisão autônoma baseada em heurísticas. Este cenário estabelece o contexto para o desenvolvimento do framework proposto neste trabalho, que busca superar as limitações identificadas através de uma arquitetura modular e adaptativa.

3. Metodologia

Este estudo adota uma abordagem de pesquisa aplicada com foco no desenvolvimento de um framework conceitual e funcional. A metodologia empregada combina revisão sistemática da literatura, modelagem arquitetural e validação experimental através de simulações em cenários controlados. O processo de desenvolvimento segue os princípios de *Design Science Research* (DSR), conforme [Frank E. et al. 2014] que estabelece diretrizes para a criação e avaliação de artefatos tecnológicos inovadores. Ainda, conforme [Frank E. et al. 2014] o *Design Science Research* (DSR) se distingue de outras metodologias dada a relevância prática e a contribuição teórica.

Para [J. vom Brocke. et al. 2020], o objetivo da DSR é gerar conhecimento sobre como encontrar soluções inovadoras para problemas importantes na forma de modelos, instâncias e métodos. Ou seja, o objetivo principal da metodologia é resolver um problema do mundo real, como por exemplo, a otimização de inspeções em linhas de transmissão, por meio da criação de um artefato funcional, que, neste caso, é o framework. Ao mesmo tempo, conforme [J. vom Brocke. et al. 2020], o processo de desenvolvimento e avaliação desse artefato deve gerar conhecimento científico, seja validando uma teoria existente ou propondo novas teorias de design, o que garante um impacto duradouro além da solução prática imediata.

Na sequência segue a descrição das etapas de planejamento e desenvolvimento do framework, sendo elas, a etapa de escolha da arquitetura do framework, a segunda etapa consiste na definição do fluxo operacional do framework; por fim a etapa que abrange a implementação, validação e dos critérios de avaliação.

3.1 Etapas de planejamento e desenvolvimento do Framework

A primeira etapa consiste na escolha da arquitetura do framework, que foi estruturado em camadas funcionais interconectadas, seguindo os princípios de design modular da metodologia DSR, conforme abordado nos estudos de caso de [J. vom Brocke et al. 2020].

Desenvolveu-se um repositório centralizado contendo múltiplas heurísticas de otimização de rotas, categorizadas por:

- Tempo de execução (rápidas e complexas)
- Tipo de otimização (minimização de distância, priorização por criticidade, etc.)
- Condições operacionais (clima, terreno, autonomia)
- Requisitos computacionais

Cada heurística foi formalizada e implementada como módulo independente. O repositório centralizado inclui heurísticas conhecidas na literatura, como em [Subramanian 2015], heurísticas do tipo *savings*, *swap*, *2-OPT*, *RVND* dentre outras. No entanto, o foco

principal deste trabalho não é aprofundar-se nas particularidades de cada heurística, mas sim na arquitetura e no fluxo de otimização do framework como um todo.

Na sequência, tem-se o planejamento de um subsistema dedicado ao monitoramento em tempo real dos parâmetros operacionais da missão como:

- Acompanhamento da execução dos waypoints;
- Detecção de desvios da rota planejada;
- Monitoramento de condições ambientais;
- Avaliação contínua da autonomia restante;
- Identificação precoce de anomalias potenciais.

O componente central do agente, é responsável pela avaliação de situações e determinação das ações apropriadas, tais como:

- Algoritmos de avaliação de viabilidade para continuação da inspeção;
- Sistema de regras para determinação da necessidade de recálculo de rotas;
- Motor de inferência para seleção da heurística apropriada em caso de recálculo;
- Algoritmos de otimização para maximização de torres completas inspecionadas;
- Mecanismos de priorização baseados na criticidade das torres.

Camada responsável pela comunicação entre os diferentes componentes do framework e sistemas externos:

- Protocolos padronizados para acesso ao banco de heurísticas;
- APIs para comunicação com sistemas de controle de voo;
- Mecanismos de persistência para registro de decisões e aprendizado;
- Interfaces para intervenção humana quando necessário.

Na segunda etapa, foi elaborado o fluxo operacional do framework, para que se possa cumprir com o objetivo que é efetuar a inspeção das linhas de transmissão de energia. O framework proposto opera segundo um fluxo sistemático de execução:

- Inicialização: O agente recebe uma rota otimizada inicial do banco de heurísticas;
- Execução: O módulo de monitoramento acompanha a navegação pelos waypoints;
- Vigilância contínua: São monitoradas possíveis adversidades durante a inspeção;
- Detecção de adversidade: Quando uma adversidade é identificada:
 - o O motor de decisão avalia a viabilidade de continuação;
 - o Em caso positivo, determinar se um recálculo de rota é necessário;
 - o Caso recálculo seja necessário, selecionar uma heurística apropriada de acordo com restrições temporais;
 - o Caso não seja viável recalcular, otimiza-se a conclusão da inspeção para maximizar o maior número de torres completas possíveis;
 - o Completude: O agente garante que nenhuma torre seja parcialmente inspecionada;
 - o Aprendizado: Ao final, registra decisões e resultados para aprimoramento contínuo.

Por fim, na etapa de Implementação, Validação e Critérios de Avaliação, o protótipo conceitual será modelado utilizando:

- Python 3.14 como linguagem principal;
- Bibliotecas especializadas para simulação de cenários adversos (Opencv, Flask, Folium, dentre outras);
- Framework será constituído baseados em árvores de decisão e aprendizado por reforço;
- Sistemas de visualização (biblioteca de visão computacional Opencv) para acompanhamento de decisões em tempo real.

A validação do framework proposto seguirá um processo em três etapas:

- Validação conceitual: Avaliação da completude e coerência do framework frente às normas de inspeção para torres de transmissão de energia;
- Simulação de cenários adversos: Execução em cenários simulados com diferentes tipos e intensidades de adversidades;
- Testes de robustez decisória: Avaliação da qualidade das decisões tomadas pelo agente em situações críticas.

O desempenho do framework será avaliado através de um conjunto abrangente de critérios:

- Taxa de conclusão de inspeção (torres completas/torres planejadas);
- Tempo médio de decisão em situações adversas;
- Qualidade das decisões (avaliada segundo os requisitos das normas de inspeção de estruturas de transmissão de energia elétrica);
- Adaptabilidade a diferentes cenários adversos;
- Eficiência na utilização da autonomia disponível.
- Capacidade de priorização em casos de recursos limitados

4. Resultados e discussão

A seguir, estão os resultados e discussão do início da implementação, o primeiro passo do desenvolvimento foi o desenho do fluxo de tomada de decisão do framework que o agente de IA deverá tomar ao se deparar com situações adversas durante o processo de inspeção.

O fluxograma, Figura 1, ilustra o funcionamento do framework proposto, destacando o processo de tomada de decisão do agente de IA durante a missão de inspeção.

Fluxograma do Framework

Fluxo de Inspeção ponto a ponto,
tomada de decisão com base na
detecção de adversidade

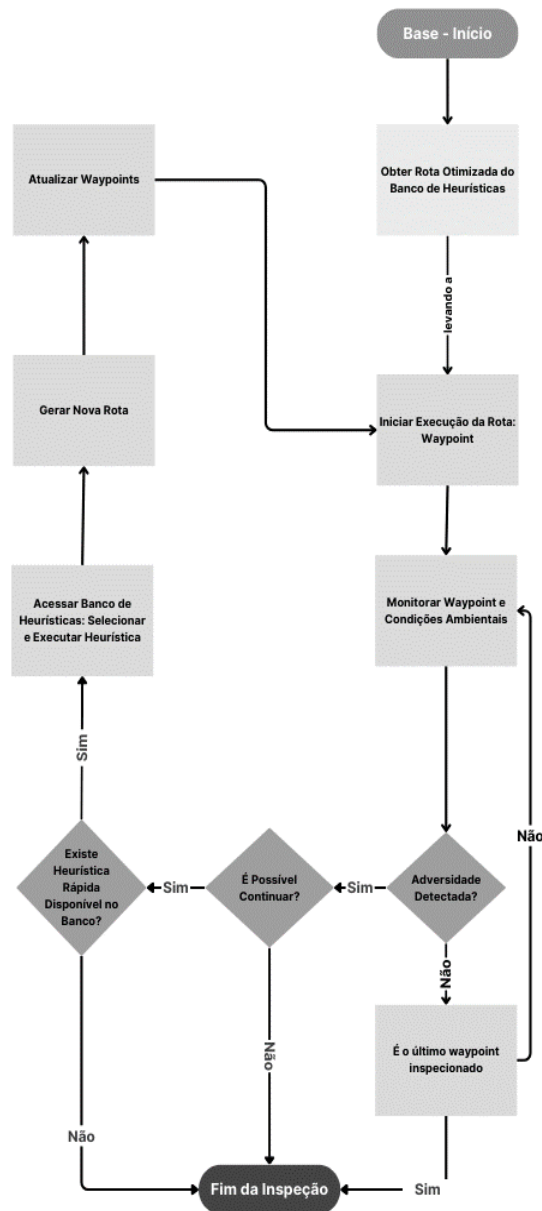


Figura 1- Fluxograma Operacional do Framework

O fluxograma operacional, Figura 1, detalhado ilustra o funcionamento do processo de inspeção nas linhas de transmissão de energia via drone. O fluxograma intitulado "Fluxograma do Framework" demonstra o processo de inspeção ponto a ponto (*waypoint*) e tomada de decisão baseada na detecção de adversidades. O diagrama começa com "Base - Início" e ramifica-se em várias etapas, incluindo "Obter Rota Otimizada do Banco de Heurísticas", "Iniciar Execução da Rota: Waypoint", e "Monitorar Waypoint e Condições Ambientais". O fluxo incorpora pontos de decisão como "Adversidade Detectada?", "É Possível Continuar?" e "Existe Heurística Rápida Disponível no Banco?".

Disponível no Banco?", com caminhos que levam a ações como "Gerar Nova Rota", "Acessar Banco de Heurísticas: Selecionar e Executar Heurística", ou "Fim da Inspeção". As conexões entre os componentes são claramente indicadas por setas direcionais, mostrando a sequência lógica e os ciclos de feedback do processo decisório.

O funcionamento sistemático do framework, Figura 1, abrange desde a obtenção da rota otimizada inicial até a conclusão da inspeção, passando por pontos críticos de decisão como a detecção de adversidades e a seleção de heurísticas apropriadas. Esta representação visual do processo decisório evidencia a capacidade do sistema em adaptar-se a diferentes cenários adversos, mantendo na conclusão de inspeção.

4. Conclusão

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de um framework conceitual e funcional para otimização de inspeções em linhas de transmissão de energia elétrica, com foco na tomada de decisão autônoma diante de adversidades operacionais. A abordagem metodológica baseada em Design Science Research permitiu a concepção de uma arquitetura modular e adaptativa, alinhada aos requisitos específicos do setor elétrico e às normas de inspeção vigentes.

A modelagem conceitual realizada estabelece as bases para implementações práticas, com definições claras de interfaces, protocolos e algoritmos necessários para operacionalização do agente inteligente. Os critérios de avaliação propostos fornecem métricas objetivas para validação do desempenho do framework em situações reais.

Os esforços subsequentes se concentrarão na prototipação e testes do agente de IA proposto. As próximas etapas abrangem a implementação computacional do framework utilizando Python 3.14 e bibliotecas especializadas (OpenCV, Flask, Folium), o desenvolvimento de ambiente de simulação para cenários adversos, a implementação das heurísticas de otimização e do motor de decisão baseado em árvores de decisão e aprendizado por reforço, além da validação experimental em cenários controlados seguindo o processo de três etapas descrito na metodologia.

Referências

ANAC(2022) . Agência Nacional de Aviação Civil. Redação -Manual de Operações.. Distrito Federal, Nov. 2022. Web page. <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/regulados/voe-135/arquivos/135-mgo.pdf>. Acessado: 2025-15-02.

ANEEL(2020) . Agência Nacional de Energia elétrica. Redação -Manual de Operações.. Distrito Federal, Nov. 2020. Web page. https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020905_2_3.pdf . Acessado: 2025-15-02.

Frank E. Ritter, Gordon D. Baxter, and Elizabeth F. Churchill (2014). Foundations for Designing User-Centered Systems: What System Designers Need to Know about People. Springer Publishing Company, Incorporated.

Fujun. D, Et Al. Research on Safety Detection of Transmission Line Disaster Prevention Based on Improved Lightweight Convolutional Neural Network. IEEE. 2022. Web page. <https://doi.org/10.3390/machines10070588/>. Acessado: 2025-04-05.

Brocke, J. vom, Hevner, A., & Maedche, A. (Eds.). (2020). Design Science Research. Cases. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-46781-4>

Martí, R., Pardalos, P. M., & Resende, M. G. (2018). "Handbook of Heuristics." Springer International Publishing.

Menendez, Et Al..Visual-Based Positioning of Aerial Maintenance Platforms on Overhead Transmission Lines. IEEE- Appl. Sci. 2019, 9 . Web page. <http://dx.doi.org/10.3390/app90101658/> . Acessado: 2025-04-05.

Odo, A., McKenna, S., Flynn, D., & Vorstius, J. B. (2021). "Aerial Image Analysis Using Deep Learning for Electrical Overhead Line Network Asset Management." IEEE Access, 9, 146281-146295. Web page. <https://doi.org/10.1109/>. Acessado: 2025-04-05

PRESSMAN, R. S. et al. Engenharia de software: Uma abordagem profissional. 9 ed. New York: AMGH, 2021.

SOMMERVILLE, I. Engenharia de software.10 ed. London: Pearson, 2019.

SILVA, M. M.; SUBRAMANIAN, A.; OCHI, L. S. An iterated local search heuristic for the split delivery vehicle routing problem. Computers and Operations Research, v. 53, 2015. ISSN 0305054