ISSN: 2965-0399 REVISTA CONEXÕES
V. 1, 2026
Revista dos cursos de Graduação e Pós-graduação da Faculdade Única de Ipatinga na modalidade EaD

MODELO MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO TECNOLÓGICA DE SUBESTAÇÕES ELÉTRICAS BASEADO NO MÉTODO AHP

MULTICRITERIA MODEL FOR TECHNOLOGY SELECTION IN ELECTRICAL SUBSTATIONS BASED ON THE AHP METHOD

MODELO MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN TECNOLÓGICA DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS BASADO EN EL MÉTODO AHP

doi.org/10.53426/con.v5i0.009

Elton Carlos Camilo[1] [2]

[1] Centro Universitário Uniunica, eltoncarlos2016@yahoo.com.br

[2] Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), São João del-Rei, MG, Brasil

Grupo de Trabalho: GT 9 – Engenharias, Arquitetura, Urbanismo e Infraestrutura

Trabalho premiado: Menção honrosa.

RESUMO

A seleção do tipo de subestação elétrica em ambientes industriais constitui um problema de decisão multicritério, no qual a definição inadequada pode gerar impactos técnicos e econômicos ao longo de todo o ciclo de vida do empreendimento, considerando o confronto entre investimento inicial (CAPEX) e custos operacionais e de ciclo de vida (OPEX/LCC) (Rozga et al., 2021). O objetivo deste trabalho é aplicar o método Analytic Hierarchy Process (AHP) para estruturar e hierarquizar critérios relevantes na escolha entre subestações isoladas a ar (AIS) e isoladas a gás (GIS). A abordagem adotada é mista, quali-quantitativa, estruturando a decisão em três níveis hierárquicos, sendo objetivo, critérios e alternativas, a partir de sete indicadores-chave de desempenho (CAPEX, OPEX, custo de ciclo de vida, área disponível para construção, impacto ambiental, desempenho operacional e segurança operacional), com julgamentos paritários estabelecidos a partir das prioridades associadas ao contexto decisório de duas indústrias de médio/grande porte, considerando suas características, restrições e requisitos técnicos e operacionais. O método foi aplicado a dois estudos de caso com perfis decisórios distintos: uma indústria orientada ao desempenho técnico e à segurança operacional e outra orientada à restrição de capital. Os resultados obtidos indicam razões de consistência de 0,048 e 0,046, respectivamente, ambas dentro do limite de aceitabilidade de 0,10 (Saaty, 1980). Na primeira indústria, a tecnologia GIS obteve prioridade global de 0,668 frente a 0,332 da AIS, ao passo que, na segunda indústria, a tecnologia AIS obteve prioridade global de 0,577 frente a 0,423 da GIS. Conclui-se que não existe tecnologia universalmente superior, e que o método AHP demonstrou-se adequado para estruturar o processo decisório entre AIS e GIS, tornando explícitos os critérios e julgamentos adotados e permitindo sua adaptação a diferentes contextos organizacionais.

Palavras-chave: subestações elétricas; método AHP; GIS; AIS; processos de decisão multicritério.

ISSN: 2965-0399 REVISTA CONEXÕES
V. 1, 2026
Revista dos cursos de Graduação e Pós-graduação da Faculdade Única de Ipatinga na modalidade EaD

1. Introdução

A definição do tipo de subestação elétrica (SE) para aplicação em ambientes industriais envolve múltiplos critérios técnicos, econômicos, ambientais e operacionais, e frequentemente dificulta a obtenção de consenso entre os agentes envolvidos no processo decisório sem o uso de ferramentas estruturadas de apoio à decisão (Rozga et al., 2021). Uma escolha inadequada pode gerar, no curto prazo, investimentos iniciais mal dimensionados; no médio prazo, aumento da taxa de falhas e dos custos de manutenção; e, no longo prazo, redução da vida útil dos equipamentos e elevação do custo total de propriedade, ou custo de ciclo de vida (*Life Cycle Cost* — LCC). Normas técnicas internacionais, como o guia IEEE (2014) para subestações isoladas a gás, apresentam diretrizes de planejamento, projeto, instalação, operação e manutenção, mas não oferecem uma metodologia estruturada de apoio à decisão entre as tecnologias AIS (*Air Insulated Switchgear*) e GIS (*Gas Insulated Substations*). Estudos indicam que a confiabilidade e o desempenho de subestações GIS estão diretamente relacionados a fatores como condição dos equipamentos, histórico de manutenção e critérios operacionais (Boeck, 1998; Koch, 2014; Suwanasri et al., 2025), evidenciando que decisões inadequadas podem aumentar custos de reparo e comprometer a estabilidade do sistema elétrico.

Diante desse cenário, observa-se a necessidade de ferramentas de suporte à decisão baseadas em métodos multicritério, como o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), proposto por Saaty (1980, 2008), que permite estruturar o problema de forma hierárquica, ponderar critérios relevantes e reduzir a subjetividade do processo decisório. Trabalhos como o de Rozga et al. (2021) aplicam diretamente o AHP na seleção de tecnologias de subestações de alta tensão, enquanto Piltan et al. (2012) demonstram sua aplicação integrada com outras técnicas de apoio à decisão em problemas energéticos complexos. Observa-se, contudo, que a literatura aborda o problema de forma fragmentada, com aplicações dependentes de julgamentos subjetivos e restrição no conjunto de critérios analisados. Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo aplicar o AHP para estruturar e hierarquizar critérios técnicos, econômicos, operacionais, de segurança e de confiabilidade na escolha entre subestações GIS e AIS em contexto industrial, apresentando resultados de dois estudos de caso com perfis decisórios distintos.

2. Metodologia

Adota-se uma abordagem mista, quali-quantitativa, estruturada em três etapas: (i) definição dos indicadores-chave de desempenho (KPIs) relevantes para a decisão; (ii) aplicação do método AHP para obtenção dos pesos relativos dos critérios e das alternativas; e (iii) síntese dos resultados em dois estudos de caso industriais com perfis decisórios distintos. Foram selecionados sete KPIs, considerando aspectos técnicos, econômicos, ambientais e operacionais: (1) CAPEX; (2) impacto ambiental; (3) área disponível para construção; (4) OPEX; (5) desempenho operacional; (6) custo de ciclo de vida (LCC); e (7) segurança operacional, definidos a partir de indicadores discutidos na literatura técnica sobre subestações GIS e AIS (IEEE, 2014; Rozga et al., 2021; Suwanasri et al., 2025).

O método AHP organiza o problema em estrutura hierárquica composta por objetivo, critérios e alternativas (Saaty, 1980, 2008), com comparações paritárias realizadas por meio da escala fundamental de Saaty (2008), com valores entre 1 (igual importância) e 9 (importância extrema). O peso relativo (w_i) de cada critério é obtido

ISSN: 2965-0399 REVISTA CONEXÕES
V. 1, 2026
Revista dos cursos de Graduação e Pós-graduação da Faculdade Única de Ipatinga na modalidade EaD

pela resolução de A·w = λmax·w, em que λmax é o maior autovalor da matriz de comparação A e n a ordem da matriz. A consistência é verificada pelo Índice de Consistência (CI = (λmax − n)/(n − 1)) e pela Razão de Consistência (CR = CI/RI), em que RI é o índice aleatório tabelado por Saaty (2008); CR inferior a 0,10 indica consistência aceitável (Saaty, 1980). O peso global de cada alternativa é obtido pela combinação linear das prioridades locais ponderadas pelos pesos dos critérios, resultando em ranqueamento no qual a alternativa de maior valor representa a decisão mais aderente ao contexto avaliado. Os julgamentos paritários foram estabelecidos a partir das prioridades associadas ao contexto decisório de cada indústria, considerando suas características específicas, restrições orçamentárias, disponibilidade de área e requisitos técnicos e operacionais. As comparações foram consolidadas nas respectivas matrizes de decisão, às quais foi aplicada a verificação de consistência prevista pelo método AHP.

3. Resultados e Discussão

O *framework* foi aplicado a dois estudos de caso industriais com perfis decisórios distintos, para verificar sua aderência a diferentes contextos organizacionais.

3.1 Indústria 1 — orientada a desempenho e segurança

A Indústria 1 não apresenta restrição significativa de área para implantação, possui capacidade financeira para arcar com custos operacionais ao longo do ciclo de vida e trata a confiabilidade técnica, a segurança operacional e a continuidade do fornecimento como fatores determinantes para a escolha, dada a alta criticidade de seu processo produtivo. Ver tabela 1.

Tabela 1 – Pesos relativos dos KPIs (Indústria 1)

KPI	Peso relativo (%)
CAPEX	22,5
Impacto ambiental	4,7
Área disponível	2,5
OPEX	9,4
Desempenho operacional	28,1
LCC	9,7
Segurança operacional	23,2

Nota: Elaborado pelo autor. A soma dos pesos pode apresentar pequena diferença em relação a 100% devido ao arredondamento dos valores.

Para essa indústria, foram obtidos λmax = 7,381, CI = 0,063 e CR = 0,048, valor inferior ao limite de 0,10, indicando consistência aceitável dos julgamentos (Saaty, 1980). Os critérios de maior peso foram desempenho operacional (28,1%), segurança operacional (23,2%) e CAPEX (22,5%). Nas condições avaliadas, a GIS apresentou maior prioridade nos critérios de área disponível, OPEX, desempenho operacional, LCC e segurança operacional, enquanto a AIS apresentou maior prioridade em CAPEX e impacto ambiental. Após a agregação das prioridades locais aos pesos dos critérios, a

ISSN: 2965-0399 REVISTA CONEXÕES
V. 1, 2026
Revista dos cursos de Graduação e Pós-graduação da Faculdade Única de Ipatinga na modalidade EaD

GIS obteve prioridade global de 0,668, frente a 0,332 da AIS, mostrando-se a alternativa mais aderente ao perfil decisório considerado para a Indústria 1.

3.2 Indústria 2 — orientada à restrição de CAPEX

A Indústria 2 apresenta perfil decisório orientado à minimização do investimento inicial, aceitando a elevação de custos operacionais futuros em troca de menor desembolso de capital no presente. No aspecto ambiental, o cenário avaliado considera a preocupação da organização com a gestão de agentes isolantes, particularmente o SF_6 empregado na configuração GIS considerada neste estudo, cujos requisitos de controle e mitigação de riscos ambientais influenciam o processo decisório (Rozga, 2013). Ressalta-se que essa condição não se aplica indistintamente a todas as soluções GIS, considerando a evolução recente de tecnologias alternativas e livres de SF_6 (Cui et al., 2024). Ver tabela 2.

Tabela 2 – Pesos relativos dos KPIs (Indústria 2)

KPI	Peso relativo (%)
CAPEX	39,8
Impacto ambiental	16,2
Área disponível	17,0
OPEX	7,6
Desempenho operacional	4,2
LCC	7,6
Segurança operacional	7,6

Nota: Elaborado pelo autor. A soma dos pesos pode apresentar pequena diferença em relação a 100% devido ao arredondamento dos valores.

Para essa indústria, foram obtidos $\lambda max = 7,368$, CI = 0,061 e CR = 0,046, também dentro do limite de aceitabilidade. O CAPEX apresentou o maior peso relativo (39,8%), seguido da área disponível (17,0%) e do impacto ambiental (16,2%), evidenciando o caráter predominantemente econômico do perfil decisório analisado. Após a agregação das prioridades locais aos pesos dos critérios, a AIS obteve prioridade global de 0,577, frente a 0,423 da GIS. Nas condições avaliadas, portanto, a elevada ponderação atribuída ao CAPEX foi determinante para deslocar a preferência global para a tecnologia AIS. Em conjunto, os dois estudos de caso demonstram que a escolha tecnológica é sensível às prioridades estabelecidas por cada organização: enquanto a maior valorização do desempenho e da segurança favoreceu a GIS na Indústria 1, a predominância do investimento inicial favoreceu a AIS na Indústria 2. Em ambos os casos, a razão de consistência permaneceu abaixo de 0,10, indicando consistência aceitável dos julgamentos paritários (Saaty, 1980).

4. Considerações Finais

Este trabalho aplicou o método Analytic Hierarchy Process (AHP) para estruturar a decisão entre subestações elétricas dos tipos AIS e GIS em contexto industrial, considerando sete KPIs técnicos, econômicos, ambientais e operacionais. Os resultados dos dois estudos de caso evidenciam que a escolha tecnológica depende da priorização dos critérios adotados em cada contexto. Na Indústria 1, orientada principalmente ao desempenho e à segurança operacional, a GIS alcançou prioridade global de 0,668, frente a 0,332 da AIS. Na Indústria 2, caracterizada pela predominância do CAPEX no processo decisório, a AIS alcançou 0,577, frente a 0,423 da GIS.

ISSN: 2965-0399 REVISTA CONEXÕES
V. 1, 2026
Revista dos cursos de Graduação e Pós-graduação da Faculdade Única de Ipatinga na modalidade EaD

Como contribuição prática, o framework proposto oferece uma estrutura replicável para apoiar decisões de engenharia relacionadas à seleção tecnológica de subestações, tornando explícitos e rastreáveis os critérios e julgamentos utilizados no processo decisório. Como limitações, destacam-se o número reduzido de estudos de caso e o caráter determinístico dos pesos utilizados. Como trabalhos futuros, propõe-se incorporar a variabilidade dos julgamentos ao processo decisório, bem como avaliar KPIs relacionados à cibersegurança, digitalização de subestações e evolução tecnológica dos meios isolantes empregados em soluções GIS.

Referências

BOECK, W. **Users guide for the application of gas-insulated switchgear (GIS) for rated voltages of 72.5 kV and above**. Paris: CIGRE, 1998. Technical Brochure 175.

CUI, Z. et al. Recent progresses, challenges and proposals on SF6 emission reduction approaches. **Science of the Total Environment**, v. 906, e167347, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167347.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **IEEE Std C37.122.1-2014: IEEE guide for gas-insulated substations rated above 52 kV**. New York: IEEE, 2014.

KOCH, H. J. **Gas insulated substations**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2014.

MARTINS, Daniel William Ferreira et al. Avaliação de conformidade e integridade estrutural de caldeira flamotubular: NR-13 e ASME. **ARACÊ**, v. 7, n. 9, e8567, 2025. DOI: 10.56238/arev7n9-308.

PILTAN, M.; MEHMANCHI, E.; GHADERI, S. F. Proposing a decision-making model using analytical hierarchy process and fuzzy expert system for prioritizing industries in installation of combined heat and power systems. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 1, p. 1124–1133, 2012.

ROZGA, P. et al. A new approach for decision support of the selection of construction technology of high-voltage substations based on AHP method. **IEEE Access**, v. 9, p. 73413–73423, 2021.

ROZGA, P. Sulphur hexafluoride (SF6) and its alternatives in high voltage equipment. **Journal of Electrical Engineering**, v. 64, n. 6, p. 384–388, 2013.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83–98, 2008. DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation**. [S. l.]: McGraw-Hill, 1980.

SUWANASRI, C.; SUWANASRI, T.; PHADUNGTHIN, R. Health and importance index-based reliability and performance analysis for gas-insulated substations. **Energies**, v. 18, n. 2, e456, 2025.