

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

NATHAN FELIPE FERREIRA SILVEIRA

**ABORDAGEM AHP-TOPSIS NA CRIAÇÃO DE ÍNDICES DE PRIORIDADE PARA
MANUTENÇÃO DE USINAS FOTOVOLTAICAS**

Uberlândia
2025

NATHAN FELIPE FERREIRA SILVEIRA

**ABORDAGEM AHP-TOPSIS NA CRIAÇÃO DE ÍNDICES DE PRIORIDADE PARA
MANUTENÇÃO DE USINAS FOTOVOLTAICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Fontes Alternativas de
Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Nunes Santos.

NATHAN FELIPE FERREIRA SILVEIRA

**ABORDAGEM AHP-TOPSIS NA CRIAÇÃO DE ÍNDICES DE PRIORIDADE PARA
MANUTENÇÃO DE USINAS FOTOVOLTAICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Fontes Alternativas de
Energia Elétrica.

Uberlândia, 07 de Maio de 2025.

Banca Examinadora:

Camila de Oliveira Dias - Mestre
camila.dias@ufu.br

Celso Rosa de Azevedo Junior - Mestre
celso.azevedo@ufu.br

Ivan Nunes Santos (Orientador) - Doutor
ivan@ufu.br

Dedico este trabalho à Gheisa Ferreira, minha
querida mãe, toda vitória minha foi precedida
por um sacrifício seu.

AGRADECIMENTOS

De antemão, agradeço à minha querida mãe e ao meu pai do coração pelo constante e massivo apoio durante minha graduação. Essa jornada tão linda, repleta de amizades, aprendizados e processos de amadurecimento, só foi possível graças ao amor que recebi de vocês. Meu mais sincero obrigado por estarem sempre ao meu lado.

Agradeço também aos queridos amigos que tive o privilégio de conhecer. Alguns seguirão comigo, outros já trilham suas próprias jornadas profissionais. Ainda assim, independentemente de onde estejam, sou grato por cada um, pelas inúmeras risadas que compartilhamos e pelas belas inspirações, auxílios e conselhos que recebi ao longo do caminho.

Sou profundamente grato aos grandes Mestres que guiaram minha trajetória dentro e fora da faculdade. Primeiramente, saúdo os professores do Colégio São Domingos, onde vivi momentos tão felizes. Meus queridos professores Germano, Jaque, Ellen, Eudes, Renato, Marcão, Paulinho, Cássio, Nad, Kike e tantos outros, estou onde estou porque cada um de vocês desempenhou um papel essencial em minha formação. Sem seu excepcional trabalho em minha infância, nada disso seria possível. Obrigado por tudo.

Expresso também minha gratidão aos Mestres que encontrei na faculdade, aqueles que moldaram minha visão de ambição, profissionalismo e integridade. Obrigado pelos ensinamentos, desafios e conselhos, que foram fundamentais para a construção do profissional que sou hoje.

Por fim, o maior agradecimento vai a Deus, cuja mão misericordiosa sempre esteve sobre meus ombros, proporcionando-me memórias que levarei para sempre com carinho e guiando-me no amadurecimento necessário para me tornar um cidadão completo e intelectualmente emancipado.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Contextualização	11
1.2	Problemática enfrentada	15
1.3	A escolha do método de priorização e seus critérios	16
1.3.1	Críticos	17
1.3.2	Análise do Estado da Arte e escolha do método mais pertinente	18
2	DESENVOLVIMENTO DO MODELO TEÓRICO DE PRIORIZAÇÃO	23
2.1	Apresentação teórica do método <i>Analytic Hierarchy Process</i>	23
2.1.1	Contexto histórico de criação do AHP	23
2.1.2	Desenvolvimento matemático do AHP	23
2.1.3	Verificação da consistência da Matriz de Saaty	25
2.2	Apresentação teórica do método <i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>	26
2.2.1	Contexto histórico de criação do TOPSIS	26
2.2.2	Desenvolvimento matemático da Matriz de Decisão TOPSIS	26
2.2.3	Determinação das soluções ideais positiva e negativa	28
2.2.4	Cálculo das distâncias euclidianas e do índice de proximidade relativa	28
3	MODELAGEM DA PRIORIZAÇÃO DE USINAS UTILIZANDO A FERRAMENTA INTEGRADA AHP-TOPSIS	30
3.1	Tabela de entrada de dados	30
3.2	Definição da Matriz de Saaty para o peso entre critérios	30
3.3	Teste da consistência da Matriz de Saaty	31
3.3.1	Uso do <i>software</i> Voracious-AHP para compensação da inconsistência	32
3.3.2	Confirmação da consistência da nova Matriz de Saaty	35
3.4	Implementação da Matriz de Decisão do TOPSIS	37
3.5	Determinação das soluções ideais, cálculo das distâncias euclidianas e obtenção do índice de proximidade	38
4	APLICAÇÃO <i>PYTHON</i> E RESULTADOS OBTIDOS	40
5	CONCLUSÃO	44
	APÊNDICE I - CÁLCULO DOS AUTOVALORES DA MATRIZ DE SAATY	45
	APÊNDICE II - ALGORITMO DE PRIORIZAÇÃO USANDO AHP-TOPSIS	46
	REFERÊNCIAS	48

LISTA DE FIGURAS

1	“Share of renewable electricity generation by technology, 2000-2030”	11
2	Oferta interna de energia elétrica por fonte	13
3	Participação das fontes na capacidade instalada	13
4	Modelo numérico desejado	16
5	Hierarquia de priorização de indústrias	19
6	Escala fundamental de Saaty	20
7	Interface do <i>Software</i> Voracious-AHP	32
8	Ratio de consistência para ajuste permitido de uma posição no Voracious-AHP .	34
9	Ratio de consistência para ajuste permitido de duas posições no Voracious-AHP	34
10	Ratio de consistência para ajuste permitido de três posições no Voracious-AHP	35

LISTA DE TABELAS

1	Tabela dos critérios estabelecidos e suas fontes de dados	18
2	Exemplo de uso do AHP nos ramos da engenharia elétrica	19
3	Tabela exemplo de aplicação da escala de Saaty	20
4	Relação índice de consistência aleatória (<i>IR</i>) por ordem de matriz (<i>n</i>)	26
5	Tabela de dados de usinas de uma das bases, localizada em Sinop	30
6	Primeira Matriz de Saaty para os critérios de priorização de UFVs	30
7	Relação posição e escala para aplicação do <i>Allowed Adjustment</i>	33
8	Matriz de Saaty para os critérios de priorização de UFVs com consistência corrigida	35
9	Resultado da priorização das usinas de uma base do Mato Grosso através do método AHP-TOPSIS	39
10	Priorização das usinas da regional de Alta Floresta	40
11	Priorização das usinas da regional de Belo Horizonte	40
12	Priorização das usinas da regional de Campo Grande	40
13	Priorização das usinas da regional de Campos Altos	41
14	Priorização das usinas da regional de Capitão Enéas	41
15	Priorização das usinas da regional de Cuiabá	41
16	Priorização das usinas da regional de Dourados	42
17	Priorização das usinas da regional de Paraisópolis	42
18	Priorização das usinas da regional de São Paulo	42
19	Priorização das usinas da regional de Sinop	43
20	Priorização das usinas da regional de Uberlândia	43

LISTA DE SIGLAS

AHP	Analytic Hierarchy Process
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
CDE	Conta de Desenvolvimento Energético
COI	Centro de Operação Integrado
ELECTRE	Elimination et Choix Traduisant la Realité
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
KPI	Key Performance Indicator
MACBETH	Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique
MAUT	Multi-Attribute Utility Theory
MDMC	Método de Decisão Multi-critério
O&M	Operação e Manutenção
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
UFV	Usina Fotovoltaica

RESUMO

O presente trabalho investigou a aplicação combinada dos métodos *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) na priorização da manutenção de usinas fotovoltaicas do Grupo Atlas. Até então, a definição das usinas que recebiam manutenção preventiva e corretiva ocorria de forma subjetiva, baseada principalmente na geração de energia, desconsiderando diversos outros critérios relevantes como tamanho da usina, propriedade e status de operação da mesma, assim como a quantidade de ordens de serviço de manutenção já abertas. A ausência de um processo estruturado para definir prioridades podia resultar em decisões ineficientes no despacho de equipes de operação e manutenção (O&M). O objetivo do estudo foi estabelecer um modelo de priorização no qual o AHP foi utilizado exclusivamente para a definição dos pesos dos critérios, enquanto o método TOPSIS foi empregado para a classificação das usinas com base nesses critérios ponderados. O trabalho foi conduzido em seis etapas, abrangendo o estudo dos modelos matemáticos, a definição e ponderação dos critérios com a equipe de engenharia, o desenvolvimento de um programa em Python para automação dos cálculos e a implementação e validação do índice gerado na rotina operacional. A justificativa para esta pesquisa residiu na necessidade de otimizar a alocação de recursos de manutenção, tornando o processo mais eficiente e preciso. A combinação dos métodos AHP e TOPSIS possibilitou uma tomada de decisão mais estruturada, aproveitando de forma mais eficaz uma base de dados extensa que, até então, era subutilizada. Espera-se que os índices de prioridade desenvolvidos tenham contribuído para a melhoria da gestão da manutenção das 129 usinas fotovoltaicas do Grupo Atlas, reduzindo custos operacionais e aumentando a confiabilidade do sistema.

Palavras-chave: Analytic Hierarchy Process, otimização, priorização, TOPSIS, usinas fotovoltaicas.

ABSTRACT

The present study investigated the combined application of the *Analytic Hierarchy Process* (AHP) and the *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) methods in prioritizing the maintenance of photovoltaic plants of the Atlas Group. Until then, the selection of plants for preventive and corrective maintenance was carried out subjectively, based mainly on energy generation, disregarding several other relevant criteria such as plant size, ownership, operational status, and the number of open maintenance work orders. The absence of a structured process for defining priorities could result in inefficient decisions regarding the dispatch of operation and maintenance (O&M) teams. The objective of the study was to establish a prioritization model in which AHP was used exclusively to define the weights of the criteria, while the TOPSIS method was employed to rank the plants based on these weighted criteria. The study was conducted in six stages, including the analysis of the mathematical models, the definition and weighting of the criteria in collaboration with the engineering team, the development of a Python program to automate the calculations, and the implementation and validation of the generated index in operational routines. The justification for this research lay in the need to optimize the allocation of maintenance resources, making the process more efficient and accurate. The combination of AHP and TOPSIS methods enabled a more structured decision-making process, making more effective use of an extensive database that had previously been underutilized. It is expected that the developed prioritization indices have contributed to improving the maintenance management of the 129 photovoltaic plants of the Atlas Group, reducing operational costs and increasing system reliability.

Keywords: Analytic Hierarchy Process, optimization, photovoltaic power plants, prioritization, TOPSIS.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Com o aumento da relevância de fontes renováveis de energia nas pautas mundiais ligadas à tecnologia, cria-se um horizonte de grande expansão das fontes solares e eólicas. A tendência mundial, como representado na Figura 1, da estagnação do crescimento da capacidade instalada de hidroelétricas, ao passo da previsão, da respectiva solar, de experimentar um salto de 8,3% em 2025 para 16,1% em 2030, praticamente dobrando a contribuição total na matriz energética mundial, de acordo com a International Energy Agency (2024). Tal situação evidencia como o tema de usinas solares se tornará cada vez mais alvo de investimentos e estudos.

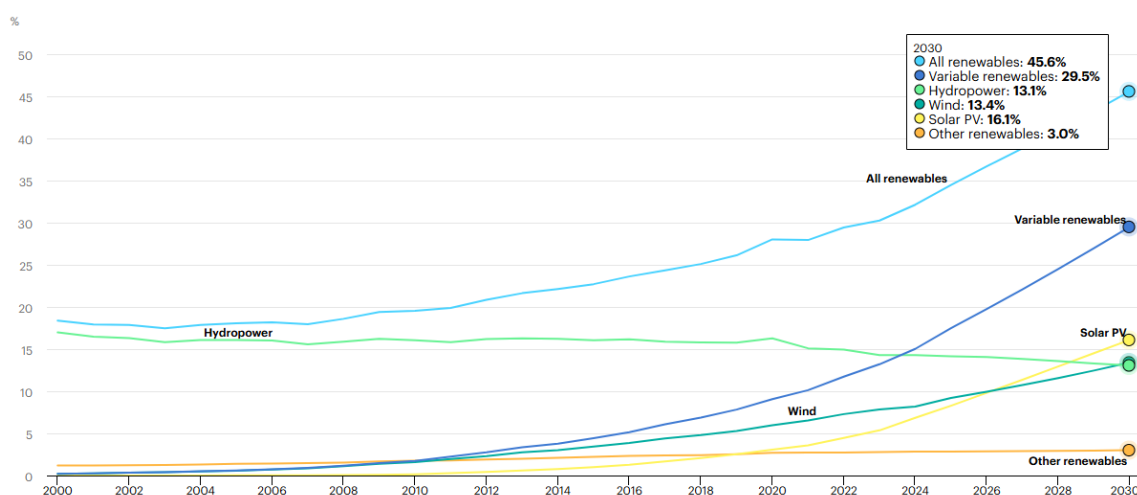


Figura 1: “Share of renewable electricity generation by technology, 2000-2030”

Fonte: Adaptado de International Energy Agency (2024)

No Brasil, o desenvolvimento da energia solar foi e vem sendo acompanhado com atenção pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), criada em 1996. Além dos órgãos responsáveis, o setor elétrico brasileiro vem sendo, desde o ano de 2001, motivado por riscos de apagão, alvo de diversas legislações e decretos que buscaram regulamentar o sistema energético como um todo, como pontuado por Silva e Souza (2024).

A lei base da autoridade estatal nesse quesito está presente na própria Constituição Federal de 1988, na qual através dos Artigos 21 e 22, recai sobre a União a competência de explorar, regular e legislar sobre a energia elétrica. No ano de 2001, através da Lei: nº 10.295/2001 e do decreto nº 4.059/2001, são estabelecidas diretrizes para o uso racional de energia assim como apontamento do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) como o responsável da fiscalização dos padrões de eficiência energética.

Com os modelos iniciais de regulamentação da energia, assim como o avanço tecnológico, surge em 2002 a Lei nº 10.438/2002, responsável pela criação do Programa de

Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) e a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dois fatores cruciais no fomento e apoio às fontes eólicas, biomassa e solares. Constitui outro marco importante, a criação em 2004 das Leis nº 10.847 e nº 10.848/2004, cujas principais contribuições foram a permissão da comercialização da autoprodução de energia e a criação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), órgão responsável pelo planejamento do setor elétrico brasileiro.

A medida que o setor de energia solar se tornou mais aquecido, a ANEEL elabora duas importantes normativas: nº 482/2012 e nº 687/2015, a primeira permitindo a produção de energia solar pelos consumidores e uso do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), também conhecido como *Net Metering*, esse estabelece o sistema de créditos na conta de luz, já a segunda ampliou os limites da micro e minigeração distribuída, permitindo o compartilhamento de créditos entre as unidades consumidoras. Através da Lei nº 14.300/2022, é considerada como microgeração toda instalação cuja capacidade instalada esteja limitada em até 75 kW, enquanto a minigeração distribuída fica limitada entre 75 kW até 5 MW. Para efeito de estudo, usinas da última citada que serão os alvos do processo de priorização.

Por fim, a última legislação referente à geração solar é a Lei nº 14.300/2022, vigente desde 2003, responsável pela taxação sobre os créditos de energia solar injetados na rede para auxílio na cobertura de custos das distribuidoras na manutenção de sua infraestrutura. (Silva; Souza, 2024).

Com isso, no quesito de diversificação da matriz energética, o Brasil é um dos países que mais se destaca na capacidade de implementar, em sua realidade, novas fontes alternativas de energia elétrica. O estudo de Balanço Energético Nacional (BEN), realizado anualmente pela EPE, indica o considerável uso de energias renováveis na composição geral da capacidade elétrica instalada brasileira.

Nos estudos mais recentes de 2023 e 2024 do BEN, indicados na Figura 2, é possível notar a estagnação do crescimento da energia proveniente de hidroelétricas no Brasil, assim como o salto de 4,4% para 7% da oferta interna de geração solar. O mesmo estudo também mostra a relação final de capacidade instalada dos diversos tipos de geração, como indicado na Figura 3, deixando claro o recuo da participação da capacidade total provenientes das hidrelétricas e usinas de biomassa, e crescimento das capacidades de geração eólica e solar, esta última saindo de uma capacidade instalada de 17006 MW em 2022 para 26366 MW em 2023, apenas de micro e minigeração distribuída. (Empresa de Pesquisa Energética, 2024).

A EPE também é responsável pelo Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), estudo este que trata de uma análise e projeção para o consumo, geração e investimento no setor de energia até o ano de 2026. Os dados deste acabam por corroborar com ambos balanços de energia tratados anteriormente, prevendo a queda da contribuição da geração hidromotriz para menos de 50% da capacidade total instalada, esta que será compensada por um crescimento de 19 GW na capacidade de usinas solares e eólicas. (Empresa de Pesquisa Energética, 2026). Pode-se traçar uma comparação direta entre os dados brasileiros e as tendências mundiais

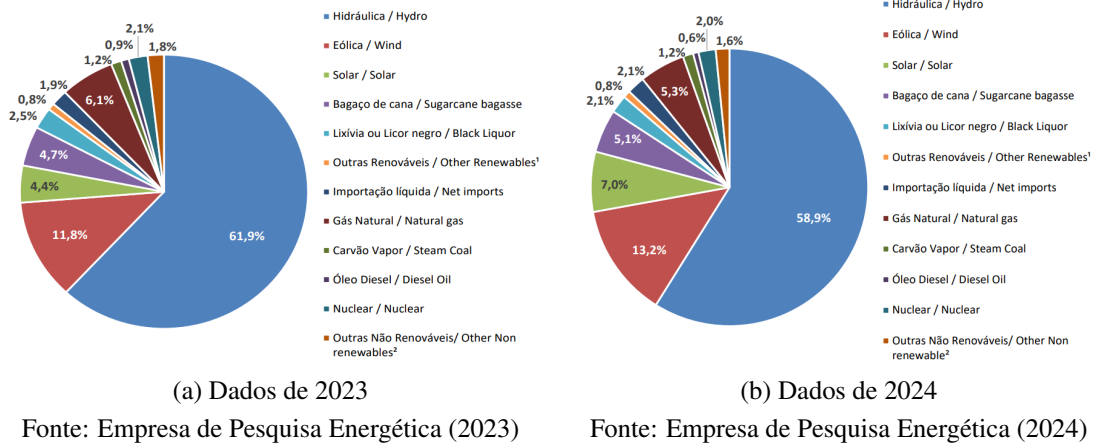


Figura 2: Oferta interna de energia elétrica por fonte

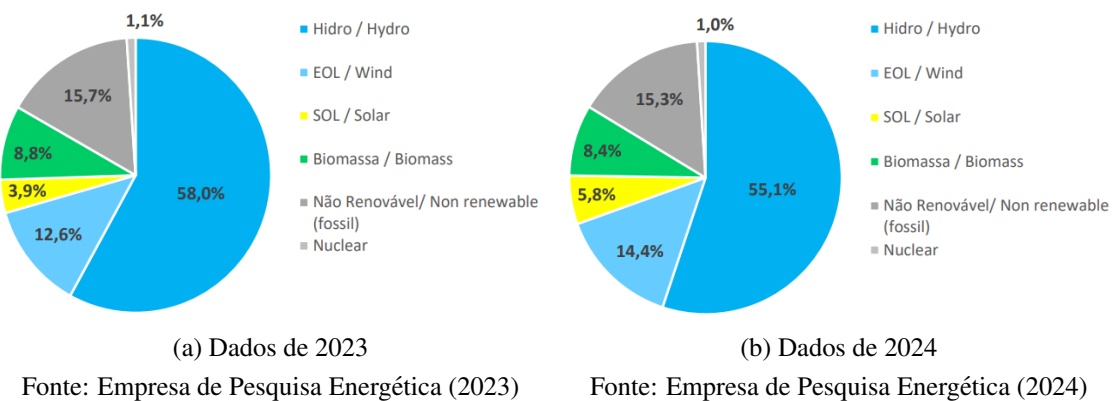


Figura 3: Participação das fontes na capacidade instalada

de transição energética, constatando que o Brasil é umas principais referências mundiais na implantação de novas tecnologias referentes ao sistema de geração de energia elétrica através da conversão de energia solar. (Hannah; Pablo, 2020).

Apesar de serem contabilizadas juntas e serem provenientes de meios similares de funcionamento, as contribuições da geração solar centralizada e distribuída são completamente diferentes em termos de escala. Enquanto a geração centralizada lida com grandes usinas, afastadas dos consumidores e de centros populacionais, a geração distribuída lida diretamente com o posicionamento de pequenas unidades geradoras próximo aos meios residenciais e consumidores.

Apesar do avanço das legislações e dos incentivos à diversificação da matriz elétrica brasileira, o crescimento acelerado da geração solar, especialmente na modalidade distribuída, tem gerado desafios operacionais significativos. A proposta de descentralizar a geração, aproximando-a do consumidor, traz ganhos evidentes como a redução de perdas no transporte de energia, maior autonomia para pequenas unidades consumidoras e diminuição das emissões poluentes. No entanto, esse modelo também exige novas formas de controle, acompanhamento e manutenção, já que a responsabilidade por garantir o bom funcionamento de centenas de unidades espalhadas pelo território nacional recai sobre estruturas operacionais que nem sempre

estão preparadas para tal escala.

No Brasil, o aumento expressivo do número de usinas fotovoltaicas conectadas à rede tem pressionado as equipes responsáveis pela operação e manutenção. Dados da ANEEL (2024) indicam que o país já ultrapassou a marca de 2,3 milhões de sistemas de geração distribuída instalados, com mais de 27 GW de potência. Este cenário torna evidente a necessidade de novos modelos de gestão, que auxiliem na tomada de decisão sobre onde e quando intervir com mais urgência. Em outras palavras, diante da limitação de recursos e da distância entre as unidades, surge a demanda por uma forma técnica e racional de definir prioridades de atendimento.

Além da complexidade técnica, há ainda a diversidade geográfica e estrutural das usinas. Enquanto algumas são implantadas próximas às bases operacionais e possuem acesso facilitado, outras exigem longas viagens, gastos com deslocamento, hospedagem e enfrentamento de condições adversas nas estradas. Esses fatores aumentam o custo das operações e tornam ineficiente qualquer tentativa de organização que não esteja amparada por critérios bem definidos. A ausência de um modelo numérico claro de priorização abre margem para decisões baseadas apenas na experiência dos responsáveis ou em pressões externas, o que pode levar a falhas na alocação dos recursos disponíveis.

A operação e manutenção de usinas solares distribuídas envolve diversas variáveis: monitoramento remoto, análise de desempenho, abertura de ordens de serviço, controle de estoque, despacho de técnicos e acompanhamento dos indicadores de desempenho. Cada uma dessas etapas consome tempo e recursos. Quando as prioridades não são bem estabelecidas, há desperdício de mão de obra, aumento no tempo de resposta e queda na disponibilidade da usina. Assim, um sistema que consiga considerar simultaneamente aspectos técnicos, contratuais, operacionais e logísticos é essencial para garantir a eficiência do processo como um todo.

Outra motivação importante para a construção de modelos de decisão está ligada à necessidade de prestação de contas e justificativa técnica das ações. Empresas de médio e grande porte, que operam um número elevado de usinas, têm sido cada vez mais cobradas por seus resultados, seja por parte de investidores, parceiros ou órgãos de fiscalização. Diante disso, torna-se fundamental que a definição das prioridades de atendimento seja feita com base em critérios objetivos e estruturados, garantindo transparência nas decisões e maior segurança para todos os envolvidos.

A expansão constante do setor solar também impõe um novo desafio: manter a padronização das decisões frente ao aumento da quantidade de ativos. À medida que novas usinas entram em operação, a análise manual e pontual se torna inviável. Os modelos tradicionais de priorização, baseados apenas na observação direta ou no histórico recente de falhas, não acompanham mais a complexidade atual. Portanto, a utilização de ferramentas que auxiliem na organização e análise dos dados se torna cada vez mais necessária.

Neste contexto, o uso de métodos estruturados para apoiar a tomada de decisão permite que os responsáveis pelas áreas de operação e manutenção atuem de forma mais eficiente, reduzam os gastos com deslocamentos desnecessários e aumentem a disponibilidade das usinas.

1.2 Problemática enfrentada

O intuito deste trabalho é estudar o processo de priorização da manutenção de usinas solares, de geração distribuída, de um grupo privado do setor elétrico brasileiro. Para efeitos de anonimato, ao longo deste estudo, esse grupo será chamado de grupo Atlas, atuante no setor de distribuição, transmissão, mercado livre de energia além de fontes renováveis de geração centralizada e distribuída. Uma das empresas que pertence ao Atlas e que faz a operação e manutenção de usinas solares da geração distribuída, será chamada de Operadora. Até o momento da realização deste estudo, a Operadora realiza o acompanhamento de 100 usinas em operação plena, 9 usinas de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), 10 usinas em operação assistida e 10 usinas de terceiros, todas distribuídas no território brasileiro ao longo dos estados de Minas Gerais, Goiás, São Paulo, Rio de Janeiro, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Ceará, Piauí e Pernambuco.

Cada estado em questão possui, em localizações estratégicas, bases com técnicos e supervisores que atuam em campo nas atividades de manutenção das usinas, atividades estas que são divididas em três categorias: preventivas, corretivas-programadas e corretivas-emergenciais. As atividades preventivas são referentes às do plano de manutenção do ano vigente, e/ou atividades extras que se mostrem necessárias, buscando prevenir falhas conhecidas através de manutenções anteriores.

As corretivas-programadas possuem uma prioridade maior em relação às preventivas, são atividades de substituição ou manutenção de algum equipamento cujo funcionamento não está em sua forma plena, interferindo na geração ou na leitura dos dados das usinas, tendo como tempo máximo de primeiro atendimento dessas ocorrências o prazo de oito dias.

Por fim, as manutenções corretivas-emergenciais são as de maior prioridade, são aquelas referentes à paradas de grande escala do funcionamento das usinas ou paradas por completo de equipamentos, interferindo ativamente na geração total da usina, sendo necessário o deslocamento de equipes para atendimento o mais rápido possível, possuindo como tempo limite de primeiro atendimento como três dias.

No processo interno da área de O&M da Operadora, é estipulada uma agenda semanal de atividades para todas as equipes de todas as bases, indicando quais atividades de manutenção preventivas ou corretivas-programadas devem ser atendidas onde, por via de regra, atividades emergenciais não entram na programação visto que o atendimento dessas é imediato.

A problemática em questão que será tratada neste estudo está presente no fato da falta de padronização do processo de priorização das atividades, uma semana é priorizada uma usina com grandes quantidades de ordens de serviço corretivas, enquanto que outra semana o peso maior recai sobre usinas atrasadas no plano de manutenção, entre outros. A priorização é de fato feita, mas não segue nenhum método robusto que permita com que a escolha final seja respaldada nos inúmeros dados técnicos colhidos diariamente.

Algumas bases são extremamente próximas de suas usinas, no entanto, algumas

requerem um dia de trabalho apenas voltado à deslocamento até o local. Ao realizar uma média das distâncias, foi constatado que a distância média de deslocamento das equipes até as usinas giram em torno de 150 quilômetros, distância que agrega em torno de si: gastos com combustível e manutenção da frota de automóveis, periculosidade do traslado em rodovias, gasto com estadia em hotel para a equipe que atende usinas mais afastadas, tornando clara a necessidade de um despacho inteligente e modelo de priorização robusto para ranquear as usinas. (Amoedo; Modarres, 2006).

1.3 A escolha do método de priorização e seus critérios

Com o modelo inicial pretendido a ser alcançado, presente na Figura 4, iniciou-se a busca de métodos de priorização usados no setor elétrico e industrial. No artigo de Mendonça *et al.* (2018), é apresentada a priorização de manutenção de motores de prensas mecânicas através da metodologia do Método de Decisão Multi-critério (MDMC). A princípio, o autor discorre sobre as duas principais escolas do MDMC, a francesa, a qual reúne os métodos PROMETHEE II e ELECTRE, e a escola americana, detentora dos modelos AHP, MAUT, MACBETH e TOPSIS.

A escola francesa, inicialmente citada, trabalha com a comparação entre critérios e suas sobreposições de modo a determinar a escolha a ser feita, enquanto que a escola americana trabalha com a chamada função de utilidade, cuja preferência da escolha é feita pelo próprio indivíduo que aplica o método.

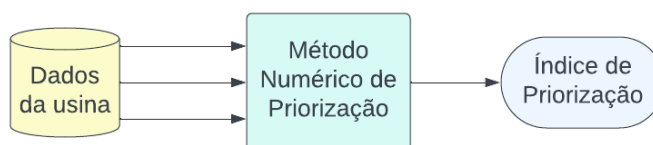


Figura 4: Modelo numérico desejado

Fonte: O Autor

Independente da escola, é estipulado um modelo generalista para todos os processos ligados ao MDMC: primeiro o processo inicia-se com a necessidade de um grupo ou um indivíduo de realizar uma decisão; segundo é necessário modelar o sistema de modo a entender as hierarquias de decisão; em terceiro está a separação de um conjunto finito de possibilidades; quarto é a montagem dos critérios provenientes de modelo que irão ranquear o conjunto; quinto e último passo é estipular o peso entre os critérios.

Seguindo esses cinco passos, torna-se possível realizar desde a escolha de qual motor de um ambiente fabril deve passar por atividades de manutenção, como indicado em Antosz e Ratnayake (2016), até a escolha de cabos específicos de uma linha de distribuição de energia que devem ser priorizados em manutenções preventivas, como explorado em Vasquez e Jayaweera (2020). Considerando que as três primeiras etapas já foram bem analisadas, passa a ser

importante determinar quais critérios serão utilizados para priorização das usinas a serem atendidas.

1.3.1 Critérios

O primeiro critério é baseado na análise e aplicação do MDMC na priorização de prensas de uma indústria no trabalho de Mendonça *et al.* (2018). No artigo em questão, o autor adotou um critério qualitativo para descrever a prioridade de atendimento dos motores das prensas: aqueles que fossem referentes à processos cujo resultado final eram produtos de alto valor agregado, ou de grande dependência para o resto da cadeia de produção, eram considerados mais prioritários, ao mesmo passo que realizou a implementação de critério completamente quantitativos, como a quantidade horas trabalhadas das máquinas, tempo médio de correção de falha, entre outros.

Isso abre um precedente para a criação de um critério qualitativo, que já é aplicado rotineiramente na priorização das usinas da Operadora, que consiste na potência de pico de corrente contínua das usinas. Essa foi a maneira mais prática para comparar usinas grandes, que fornecem energia a uma quantidade muito maior de clientes, em relação à usinas pequenas que atendem pouca carga, essas últimas devem ser menos prioritárias que as primeiras citadas.

Como exposto em Muchiri *et al.* (2009), *Key Performance Indicators* (KPIs) são os fatores de maior importância na tomada de decisão em um ambiente fabril. Tendo em vista isto, a ideia do segundo critério a ser utilizado envolve o principal dado acompanhando pelo Centro de Operação Integrado (COI) da Operadora, a eficiência de geração da usina, esta que indica se a usina está produzindo energia de forma similar ao simulado e esperado. Usinas com baixa eficiência indicam algum fator físico, ou falha de leitura de dados, que interfere no KPI em questão, sendo pertinente a análise em campo, sendo também um dos principais indicadores avaliados pelos acionistas.

Os terceiro e quarto critérios partem de uma necessidade importantíssima, exemplificada em Tsang (2002): a conciliação entre o setor de operação, que acompanha diariamente o funcionamento das usinas, com o setor de controle e planejamento da manutenção (PCM). Novamente, buscando a maneira mais prática de integrar as demandas dessas duas áreas no quesito de priorização, é estipulado que o número de ordens de serviço corretivas e preventivas, provenientes do banco de dados gerado pelo *software* de manutenção usado pela Operadora, devem ser também considerados ao priorizar o atendimento de uma usina em específico.

O quinto critério que chegou a ser estudado para implementação, mas que foi removido do estudo, é o conceito de vacância. Por se tratar de geração distribuída, as usinas da Operadora operam com a venda de energia via cooperativas e consórcios. Quando a quantidade de clientes, e consequentemente a carga requerida, é menor que a gerada pela usina, o excedente é convertido em crédito aos clientes.

As usinas presentes no estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, se provaram

especialmente impactadas por esse fator de alta vacância de clientes. Durante o início do estudo, era uma problemática necessária de ser tratada no modelo de priorização, porém a Operadora adotou um plano de ação de realizar o desligamento controlado de suas usinas nesses dois estados, tal plano torna desnecessária a atuação deste sexto critério.

Sendo assim, cria-se uma subdivisão entre as usinas, um grupo é composto pelas usinas ligadas, que seguem atendendo clientes normalmente e são prioridades altas de atendimento de qualquer ocorrência, enquanto o outro é composto por usinas desligadas, que não atendem nenhum cliente mas que ainda precisam ser atendidas, mesmo que com menor prioridade, visto que são ativos da Operadora. Raras exceções são as usinas ligadas de forma parcial, cuja diferenciação será explicada a fundo na seção de implementação do método.

Por fim, através do paralelo da temática de prensas com produtos de alto impacto exemplificadas no primeiro critério, que utiliza a potência CC da usina para diferenciar usinas prioritárias, é estipulado o sexto critério como a propriedade da usina, consistindo se a usina em questão é própria do grupo (baixa prioridade) ou proveniente de terceiros que contrataram o serviço de O&M (alta prioridade).

Todos os critérios estabelecidos e suas respectivas fontes de dados estão presentes na Tabela 1.

Critério	Dado usado	Fonte do dado
C1	Potência CC [MWp]	Projeto da usina
C2	Eficiência de geração	Centro de Operação Integrado (COI)
C3	Número de OS corretivas	<i>Software</i> de Manutenção
C4	Número de OS preventivas	<i>Software</i> de Manutenção
C5	Status de operação	Centro de Operação Integrado (COI)
C6	Propriedade da usina	Contrato

Tabela 1: Tabela dos critérios estabelecidos e suas fontes de dados

Fonte: O Autor

1.3.2 Análise do Estado da Arte e escolha do método mais pertinente

A princípio, como exposto em Attanayake, Chandima e Markeset (2024) e na Tabela 2, devido o maior volume de uso em casos de priorização aplicados em engenharia elétrica, o método inicial escolhido para estudo e possível implementação foi o *Analytic Hierarchy Process* (AHP).

Tal método estabelece uma relação de hierarquia dividida em níveis, para efeito de exemplificação, será utilizado um exemplo base presente em Saaty (1980). Considerando que Thomas Lorie Saaty era membro de governo e desenvolveu seu método para auxiliar em decisões de cargos de liderança do Estados Unidos da América, o exemplo que é apresentado é voltado a um objetivo, decidir quais indústrias deveriam ser priorizadas no atendimento de energia caso houvesse uma diminuição da geração de eletricidade e poucas pudessem ser atendidas.

Campo de Uso	Referência
Linhas de distribuição	(Bernardon <i>et al.</i> , 2011)
Subestações de distribuição	(Azhar <i>et al.</i> , 2023)
Gestão de pico de demanda	(Bian; Pipattanasomporn; Rahman, 2015)
Linhas de transmissão	(Gharakheili; Fotuhi-Firuzabad; Dehghanian, 2018)
Geração eólica	(Wang <i>et al.</i> , 2021)
Subestações de alta tensão	(Rozga <i>et al.</i> , 2021)
Transformadores	(Saroja; Haseena; Madavan, 2023)
Geração solar	(Ma <i>et al.</i> , 2013)

Tabela 2: Exemplo de uso do AHP nos ramos da engenharia elétrica
Fonte: Adaptado de Attanayake, Chandima e Markeset (2024)

O objetivo final, neste caso o bem estar da nação, é o primeiro nível da hierarquia. Na aplicação do método para a escolha das Usinas Fotovoltaicas (UFVs), o primeiro nível seria a otimização de recursos da Operadora. O segundo nível da hierarquia é composto pelos critérios que serão usados na avaliação das indústrias, neste exemplo são as contribuições das indústrias aos três grandes setores do país: sustentação econômica do país, manutenção da saúde e participação em recursos de defesa nacional. Para o estudo das UFVs, esses critérios são os mesmos apresentados na Tabela 1. Por fim, o terceiro nível hierárquico é composto pelas opções a serem escolhidas pelo tomador de decisão, para o exemplo dos EUA, as opções são as indústrias, para a aplicação com as UFVs, são as próprias usinas solares. O esquemático da hierarquia pode ser visto na Figura 5.

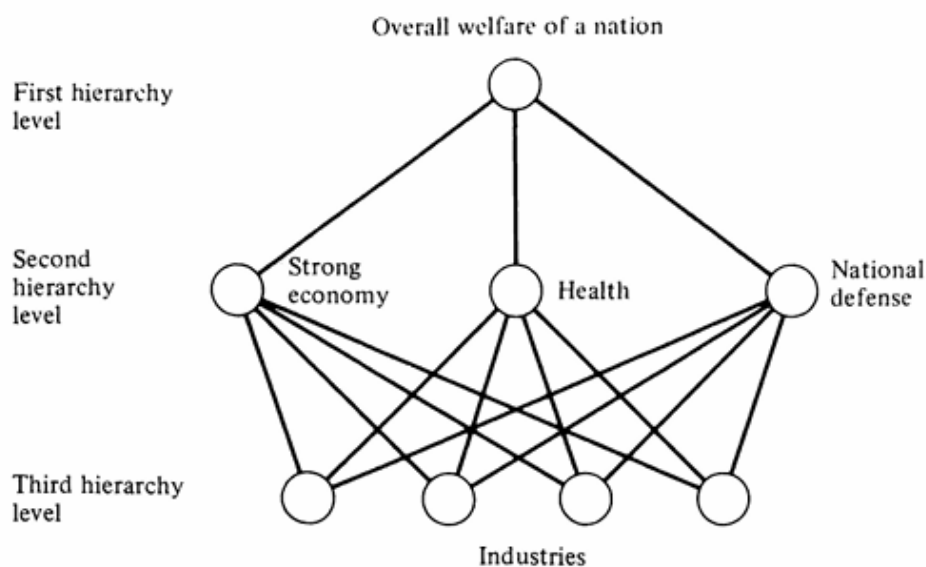


Figura 5: Hierarquia de priorização de indústrias
Fonte: Saaty (1980)

Note que cada opção do terceiro nível, será comparada com todas as outras opções em um mesmo critério. Considerando n a quantidade de critérios e m a quantidade de escolhas do

terceiro nível hierárquico, serão necessárias n matrizes $m \times m$ para a comparação dos termos para cada critério e uma matriz $n \times n$ para comparação entre os próprios critérios. Tal comparação é feita utilizando a escala fundamental de Saaty, exposta na Figura 6, onde a importância de uma opção sobre a outra é medida através de valores entre 1 e 9, do menos ao mais importante respectivamente, levando em conta que a comparação reversa recebe a escala recíproca, isto é, o inverso do valor. Exemplo: Se, ao comparar a Indústria A e B, dentro de um dos três critérios, a opção A tem grau de importância maior sobre a B equivalente a 7, então a escala de importância w_{AB} também é 7. Já a escala de B em relação a A é valor recíproco, w_{BA} seria igual a $1/7$.

Intensity of importance	Definition	Explanation
1	Equal importance	Two activities contribute equally to the objective
3	Weak importance of one over another	Experience and judgment slightly favour one activity over another
5	Essential or strong importance	Experience and judgment strongly favor one activity over another
7	Very strong or demonstrated importance	An activity is favoured very strongly over another; its dominance demonstrated in practice
9	Absolute importance	The evidence favoring one activity over another is of the highest possible order of affirmation
2, 4, 6, 8	Intermediate values between adjacent scale values	When compromise is needed
Reciprocals of above nonzero	If activity i has one of the above nonzero numbers assigned to it when compared with activity j , then j has the reciprocal value when compared with i	A reasonable assumption
Rationals	Ratios arising from the scale	If consistency were to be forced by obtaining n numerical values to span the matrix

Figura 6: Escala fundamental de Saaty
Fonte: Saaty (1980)

Tal reciprocidade está exposta em outro exemplo na Tabela 3, onde são estipulados pesos para três critérios aleatórios. A diagonal principal da matriz sempre é unitária, visto que são comparações entre termos iguais. No exemplo, o critério 2 é cinco vezes mais importante que o critério 1, enquanto que o critério 2 é quatro vezes mais importância que o critério 3.

	C1	C2	C3
C1	1	5	9
C2	1/5	1	1/4
C3	1/9	4	1

Tabela 3: Tabela exemplo de aplicação da escala de Saaty
Fonte: O Autor

Através de operações de normalização das tabelas, cada opção do terceiro nível hierárquico são associados às médias para cada um dos critérios selecionados, o que por fim revela a contribuição final de cada opção, quanto maior a contribuição, mais prioritária é aquela decisão. É importante notar que, por depender de pesos subjetivos e decididos através de fator humano, as matrizes podem muitas vezes gerar resultados finais que não são confiáveis. O principal indicador do sucesso na escolha dos pesos entre critérios e pesos entre opções dentro dos critérios é o índice de consistência (IC), cujo método de cálculo é o exemplificado na Equação (2), onde A é a matriz de Saaty sendo analisada, w os pesos normalizados que compõem a matriz de pesos (W), λ_{max} o maior autovalor da matriz A , calculado na Equação (1), e n é a ordem da matriz A .

$$A \cdot W = \lambda_{max} \cdot W \quad (1)$$

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

Quando comparado com outros métodos de decisão como o DEA e o MCDA-C, o método do AHP apresenta resultados bem satisfatórios uma vez que reúne em sua análise a subjetividade, simplicidade e adaptabilidade (Júnior *et al.*, 2015). No entanto, estudos realizados em Widiantha *et al.* (2018), indicam que a precisão do AHP (81,67%) deixa a desejar quando comparado com os métodos do PROMETHEE (93,34%) e TOPSIS (95%).

Tal diferença ocorre porque, como o AHP depende da associação de $n+1$ matrizes para n critérios, qualquer inconsistência na definição dos pesos entre critérios ou dentro de um critério específico tende a se propagar e se intensificar à medida que o número de critérios ou alternativas aumenta, o que pode resultar em uma priorização equivocada. Supraja e Kousalya (2016) destaca a importância de verificar a inconsistência não apenas da matriz fundamental, mas também de todas as matrizes geradas durante a análise de cada critério. Isso evidencia que a maior qualidade do método, sua capacidade de capturar subjetividades em critérios qualitativos, também representa sua principal fraqueza, além do maior custo computacional associado. (Putra; Rakhman; Biddinika, 2019).

Como a maioria dos critérios estipulados e apresentados na Tabela 1 é de natureza quantitativa, a alternativa considerada mais robusta, conforme demonstrado em Giacomo e Concetta (2017) e Güner, Sakar e Yet (2023), é a associação do AHP com o TOPSIS. Diferentemente da comparação par-a-par realizada pelo AHP, o método TOPSIS se baseia na distância euclidiana até a solução ideal, analisando os dados por meio de apenas duas matrizes, independentemente do número de critérios ou alternativas. Isso torna o método significativamente mais eficiente sob a perspectiva computacional.

Uma das matrizes é composta pelos valores das grandezas associadas a cada usina, como ordens de serviço, eficiência e potência CC. O critério qualitativo relacionado à propriedade da UFV também é incorporado a essa matriz, mas, assim como ocorre no AHP,

ele é convertido para um formato numérico por meio de uma escala, a qual será discutida durante a implementação do modelo numérico. Por outro lado, a segunda matriz corresponde à matriz de pesos fundamentais de Saaty no método AHP, sendo essa a única fonte potencial de inconsistência no modelo AHP-TOPSIS. Isso facilita significativamente a correção dos pesos caso surja alguma inconsistência.

No estudo de Giacomo e Concetta (2017), a abordagem AHP-TOPSIS é utilizada para priorizar atividades de manutenção em refinarias de petróleo. Já em Güner, Sakar e Yet (2023), essa metodologia auxilia na elaboração de planos de manutenção extra para veículos pertencentes a uma grande frota empresarial. Ambos os casos demonstram a robustez da combinação entre AHP e TOPSIS, além de reforçar a capacidade da ferramenta conjunta na otimização de recursos e na redução de custos. Com isso, o método de priorização é definido e a próxima etapa consiste no desenvolvimento de sua aplicação.

2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO TEÓRICO DE PRIORIZAÇÃO

2.1 Apresentação teórica do método *Analytic Hierarchy Process*

2.1.1 Contexto histórico de criação do AHP

O *Anatyc Hierarchy Process*, é um método de decisão múltiplo-critérios que foi desenvolvido por Thomas Saaty no início da década de 1970, e publicado em 1980, enquanto trabalhava no Departamento de Defesa dos Estados Unidos, buscando uma ferramenta que auxiliasse na tomada de decisões complexas e de interesse do país. (Saaty, 1980).

O primeiro grande uso da metodologia foi em 1973, utilizado no estudo e priorização de escolhas durante o planejamento da infraestrutura de transporte do Sudão. (Saaty, 1977). Outras temáticas estudadas por Saaty com seu método, no contexto de Guerra Fria, foram em decisões estratégicas de órgãos de pesquisa e inovação como a NASA, modelagem de cenários de desarmamento e terrorismo, além de usos voltados ao planejamento energético, priorizando setores econômicos essenciais.

A principal ideia de Saaty foi a implementação de um sistema de decisão que se baseasse na forma com que o ser humano, em sua essência, pratica ao tentar escolher uma opção entre várias: compará-las par a par através de critérios, unindo dados qualitativos e quantitativos sob um mesmo escopo. (Saaty, 1980).

2.1.2 Desenvolvimento matemático do AHP

Tendo em vista que o método do AHP será utilizado apenas para montagem da matriz de pesos entre critérios, será apresentado nessa seção o processo matemático para preparar tal matriz para a inserção no método do TOPSIS. O primeiro passo para a solução é montar a matriz de Saaty (A) que relaciona n critérios e seus pesos.

$$A_{n \times n} = \begin{array}{c|ccccc} & C_1 & C_2 & C_3 & \cdots & C_n \\ \hline C_1 & a_{11} & 1/a_{21} & 1/a_{31} & \cdots & 1/a_{n1} \\ C_2 & a_{21} & a_{22} & 1/a_{32} & \cdots & 1/a_{n2} \\ C_3 & a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & 1/a_{n3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n & a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{array} \quad (3)$$

Note que os termos acima da diagonal principal são recíprocos dos termos abaixo da mesma. Para efeitos de visualização mais intuitiva das operações matemáticas, os valores recíprocos serão substituídos por termos com os índices de referência das linhas e colunas em questão.

$$A_{n \times n} = \begin{array}{c|ccccc} & C_1 & C_2 & C_3 & \cdots & C_n \\ \hline C_1 & a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ C_2 & a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ C_3 & a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n & a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{array} \quad (4)$$

Em seguida, todos os termos devem ser normalizados, dividindo o termo em questão pela soma dos termos da coluna em que este está inserido.

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (5)$$

De modo que a matriz de Saaty agora se torna uma matriz inteiramente normalizada (B).

$$B_{n \times n} = \begin{array}{c|ccccc} & C_1 & C_2 & C_3 & \cdots & C_n \\ \hline C_1 & b_{11} & b_{12} & b_{13} & \cdots & b_{1n} \\ C_2 & b_{21} & b_{22} & b_{23} & \cdots & b_{2n} \\ C_3 & b_{31} & b_{32} & b_{33} & \cdots & b_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n & b_{n1} & b_{n2} & b_{n3} & \cdots & b_{nn} \end{array} \quad (6)$$

Para gerar a média dos pesos dos critérios, é necessário somar todos os termos de uma linha e dividi-los pela quantidade de termos.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n b_{ij}}{n} \quad (7)$$

De modo que os critérios são simplificados para a média de seus pesos na matriz de médias (W).

$$W_n = \begin{array}{c|c} & \text{Média} \\ \hline C_1 & w_1 \\ C_2 & w_2 \\ C_3 & w_3 \\ \vdots & \vdots \\ C_n & w_n \end{array} \quad (8)$$

É a matriz W que será utilizada posteriormente no método TOPSIS, por isso a solução completa para o método do AHP não será trabalhada até o fim. Ainda assim, é necessário realizar o teste do índice de consistência da matriz de Saaty, de modo a determinar se os pesos

escolhidos são condizentes com uma resposta matemática confiável.

2.1.3 Verificação da consistência da Matriz de Saaty

De modo a determinar o índice de consistência (IC), de acordo com as Equações (1) e (2), se faz necessário encontrar o autovalor máximo da matriz de Saaty (λ_{max}):

$$A \cdot W = \lambda_{max} \cdot W \quad (9)$$

Por se tratar de uma equação matricial, não se pode simplificar ambos lados dividindo pela matriz de média dos critérios (W), é necessário de fato resolvê-la, logo, para a solução desta expressão, utiliza-se a equação característica para determinação do autovalor (λ) da matriz de Saaty, onde I é a matriz identidade de orden n :

$$\det(A - \lambda \cdot I) = 0 \quad (10)$$

Inserindo as respectivas matrizes necessárias para prosseguimento da solução:

$$\det \left(\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} - \lambda \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \right) = 0 \quad (11)$$

Por fim, é feita a multiplicação e subtração dos termos, chegando no formato final da matriz antes de ser aplicado o determinante:

$$\det \begin{pmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} - \lambda & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} - \lambda \end{pmatrix} = 0 \quad (12)$$

A solução do determinante recairá sobre um polinômio de ordem n , o máximo autovalor (λ_{max}) é o maior valor obtido através da solução do polinômio. Em posse deste valor numérico, pode-se calcular o índice de consistência através da Equação (2). Após o cálculo do IC , é calculado o fator final que constatará se a matriz obedece os critérios de consistência exigidos, cujo nome é Ratio de Consistência (RC) e é encontrado dividindo o índice de consistência pelo índice de consistência aleatória (IR).

Este último é um parâmetro calculado por Saaty e tabelado para diferentes ordens de

matrizes, e ajuda a normalizar o IC encontrado, de modo a indicar se as escolhas para os termos da matriz de importância foram mais pertinentes do que a escolha completamente aleatória dos mesmos.

Sua expressão de cálculo está exposta na Equação (13) e os valores tabelados para IR são exibidos na Tabela 4. O valor final de RC deve ser inferior a 0,1, caso isso não ocorra, todos os termos da matriz de importância devem ser revistos e a análise de consistência refeita. Esse método rigoroso de verificação da consistência, existe para manter a veracidade das comparações, por exemplo, se A é preferível sobre B, e B é preferível sobre C, logo A é preferível sobre C. Se essa relação não se sustenta através dos pesos escolhidos, então a inconsistência se torna demasiada para a obtenção de uma resposta de priorização apropriada.

$$RC = \frac{IC}{IR} \leq 0,1 \quad (13)$$

Ordem da matriz (n)	Índice de Consistência Aleatória (IR)	Ordem da matriz (n)	Índice de Consistência Aleatória (IR)	Ordem da matriz (n)	Índice de Consistência Aleatória (IR)
1	0,00	6	1,24	11	1,51
2	0,00	7	1,32	12	1,48
3	0,58	8	1,41	13	1,56
4	0,90	9	1,45	14	1,57
5	1,12	10	1,49	15	1,59

Tabela 4: Relação índice de consistência aleatória (IR) por ordem de matriz (n)
Fonte: Adaptado de Saaty (1980)

2.2 Apresentação teórica do método *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*

2.2.1 Contexto histórico de criação do TOPSIS

O método do TOPSIS também foi criado sob o contexto da Guerra Fria, pelos esforços de Ching-Lai Hwang e Yoon Kwangsun, nos Estados Unidos da América, no ano de 1981. Ao contrário do AHP, o TOPSIS foca na análise preferencial de critérios quantitativos e objetivos, não recorrendo às comparações par a par do primeiro citado, mas indicando a melhor decisão através da distância euclidiana da opção em análise das soluções negativa e positiva. Considerando as ferramentas de decisão multi-critério, além do contexto histórico que demandava a tomada de decisões complexas com confiabilidade, sabe-se que o TOPSIS foi usado em diversas áreas de interesse, como o planejamento energético, priorização de infraestrutura de transporte, defesa nacional e tomada de decisão em saúde pública. (Tzeng; Huang, 2011).

2.2.2 Desenvolvimento matemático da Matriz de Decisão TOPSIS

O processo de decisão através do TOPSIS inicia com a construção de uma Matriz de Decisão, na qual as linhas são preenchidas pelos dados quantitativos, enquanto as colunas

representam de qual critérios tais dados fazem referência. Ao contrário da Matriz de Saaty, essa matriz não é quadrada, uma vez que não se relaciona as opções em comparações par a par. Sendo assim, a dimensão desta matriz tratada é de m opções para n critérios:

$$X_{m \times n} = \begin{array}{c|ccccc} & C_1 & C_2 & C_3 & \cdots & C_n \\ \hline \text{Opção 1} & x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1n} \\ \text{Opção 2} & x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots & x_{2n} \\ \text{Opção 3} & x_{31} & x_{32} & x_{33} & \cdots & x_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Opção } m & x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & \cdots & x_{mn} \end{array} \quad (14)$$

Vale ressaltar que a transformação de dados qualitativos para quantitativos deve ser realizada nesse estágio de preenchimento da matriz. Tal transformação é feita aplicando uma simples conversão para algarismos, geralmente limitada entre 1 e 10. Em um exemplo de escolha de motores para priorização, dos tipos A e B, caso A fosse um motor mais importante na linha de produção, poderia ser atribuído o valor 10 para inserção na matriz, enquanto que para o motor B o valor seria 1. Dados quantitativos entram normalmente sem alteração na matriz.

A matriz deve passar então pelo processo de normalização de seus termos. Diferentemente da Matriz de Saaty, a qual era normalizada dividindo o termo pela soma dos termos da coluna, a Matriz de Decisão deve ser normalizada dividindo o termo pela raiz do somatório do quadrado dos termos da coluna, como indicado na Equação (15).

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (15)$$

A Matriz de Decisão (X) passa a ser agora a Matriz de Decisão Normalizada (R):

$$R_{m \times n} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \cdots & r_{2n} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & \cdots & r_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (16)$$

A Matriz Normalizada (R) é multiplicada em cada coluna pelo respectivo termo do vetor de média dos critérios (W), proveniente do AHP, exposto na Equação (8). Tal multiplicação gera a Matriz de Decisão Ponderada (V):

$$V_{ij} = \langle R_j, W_i \rangle \quad (17)$$

$$V_{m \times n} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \cdots & r_{2n} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & \cdots & r_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$V_{m \times n} = \begin{pmatrix} w_1 \cdot r_{11} & w_2 \cdot r_{12} & \cdots & w_n \cdot r_{1n} \\ w_1 \cdot r_{21} & w_2 \cdot r_{22} & \cdots & w_n \cdot r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 \cdot r_{m1} & w_2 \cdot r_{m2} & \cdots & w_n \cdot r_{mn} \end{pmatrix} \quad (19)$$

De forma generalista, os termos da Matriz de Decisão Ponderada (V) podem ser encontrados pela Equação (20).

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (20)$$

2.2.3 Determinação das soluções ideais positiva e negativa

Para a determinação da solução ideal positiva, deve-se analisar cada coluna, de modo a determinar o melhor valor contido na mesma. Caso o critério seja de teor positivo, isto é, quanto maior for seu valor, melhor, considera-se o maior valor, como indicado na Equação (22). Caso seja um critério de teor negativo, cujo valor ideal é o menor possível, então considera-se como solução ideal o menor dos valores da coluna, indicado na Equação (23). Por fim, os valores são inseridos nos vetores de soluções ideais representados na Equação (21).

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\}, \quad A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \quad (21)$$

$$v_j^+ = \max v_{ij}, \quad v_j^- = \min v_{ij} \quad (22)$$

$$v_j^+ = \min v_{ij}, \quad v_j^- = \max v_{ij} \quad (23)$$

2.2.4 Cálculo das distâncias euclidianas e do índice de proximidade relativa

Com a Matriz de Decisão Ponderada (V) e as soluções ideais positiva (A^+) e negativa (A^-), pode-se calcular as distâncias euclidianas de cada opção, isto é, de cada linha, em relação às soluções ideais.

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (24)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (25)$$

Em posse das distâncias euclidianas, pode-se por fim calcular o índice de proximidade relativa (C), indicador da proximidade de uma determinada opção da solução ideal. Quanto mais próximo de um, melhor é a opção. Assim, é finalizada a aplicação do método e a implementação da recomendação proveniente do mesmo fica a critério do tomador de decisão.

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (26)$$

3 MODELAGEM DA PRIORIZAÇÃO DE USINAS UTILIZANDO A FERRAMENTA INTEGRADA AHP-TOPSIS

A princípio, antes da implementação do código fonte para priorização, será testado o método de forma analítica na priorização de um conjunto de usinas de uma base da Operadora do estado do Mato Grosso (MT).

3.1 Tabela de entrada de dados

A tabela de entrada de dados prática, a qual será tratada durante a programação do código fonte, é disposta para a base de Sinop como mostrado na Tabela 5:

Sigla da Usina	Potência [MWp]	Eficiência de geração [%]	OS corretivas	OS preventivas	Desligada?	Cliente
1IN	6,93	102,82	4	1	Não	Terceira
1MT	6,75	112,26	5	1	Sim	Própria
2IN	6,93	105,37	0	0	Não	Própria
2MT	3,72	95,48	0	6	Não	Própria
3MT	2,7	83,22	4	3	Parcial	Própria

Tabela 5: Tabela de dados de usinas de uma das bases, localizada em Sinop

Fonte: O Autor

É feito um adendo sobre o critério da eficiência de geração e porque a mesma ultrapassa os 100% esperados: a forma com que a eficiência é calculada envolve a comparação entre energia gerada real e energia gerada simulada. Usinas que produzem mais do que esperado acabam por ficar com eficiência superior a 100%.

3.2 Definição da Matriz de Saaty para o peso entre critérios

Através de discussões internas do Centro de Operação Integrado, engenheiro de manutenção, área de planejamento e controle de manutenção da Operadora, chegou-se na relação de pesos entre critérios, exemplificados na Tabela 6.

	Potência CC	Eficiência	OS Corretivas	OS Preventivas	Usina Desligada	Cliente
Potência CC	1	1	1/5	1/3	1/9	1/9
Eficiência	1	1	4	5	1/9	1/9
OS Corretivas	5	1/4	1	9	1/7	1/9
OS Preventivas	3	1/5	1/9	1	1/7	1/9
Usina Desligada	9	9	7	7	1	1/9
Cliente	9	9	9	9	9	1

Tabela 6: Primeira Matriz de Saaty para os critérios de priorização de UFVs

Fonte: O Autor

Através da mesma, é possível identificar o grande peso da priorização a partir da propriedade da usina e do status de funcionamento dela. Usinas cuja operação é respaldada através de contrato com terceiros são prioridade máxima, independente de qualquer outro indicador. Já o status de operação da usina é considerado com prioridade máxima em relação ao tamanho e eficiência da usina, visto que, caso a usina esteja desligada, tais critérios são indiferentes, ao passo que uma prioridade alta, porém não absoluta, é estabelecida com os critérios de quantidade de OSs, visto que independente se a usina está desligada ou não, as atividades corretivas e preventivas devem ser implementadas e realizadas da mesma forma.

3.3 Teste da consistência da Matriz de Saaty

Para testar a consistência da matriz, são calculados os autovalores da mesma de modo a determinar seu maior valor. Devido o tamanho da matriz e complexidade de calcular o polinômio característico gerador dos autovalores, é utilizado o recurso da linguagem *Python* para cálculo direto dos autovalores. Código este que está exposto no Apêndice I. OS resultados dos autovalores são exibidos na Equação (27).

$$\lambda = \begin{bmatrix} 8,07447595 \\ 3,59642059 \\ 3,59642059 \\ 1,331701 \\ 1,87526058 \\ 1,87526058 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Tendo em vista que o maior autovalor é 8,07447595, prossegue-se para o cálculo do índice de consistência utilizando a Equação (2).

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{8,07447595 - 6}{6 - 1} \quad (28)$$

$$IC = 0,41489519$$

Conclui-se os cálculos de consistência calculando o ratio de consistência tendo em vista a expressão matemática exposta na Equação (13) e o valor do índice de consistência aleatória para ordem seis exposto na Tabela 4.

$$RC = \frac{IC}{IR} = \frac{0,41489519}{1,24} \quad (29)$$

$$RC = 0,33459$$

O resultado comprova uma falha cabal durante o processo de escolha dos pesos entre critérios, a Matriz de Saaty possui inconsistência três vezes maior do que o permitido, cujo valor é 0,1. A compensação dos termos para que a matriz se torne mais consistente pode

ser feita por dois métodos, o primeiro dele trabalha com a substituição por tentativa e erro, o que é extremamente trabalhoso e ineficaz, enquanto que o segundo método engloba o uso de algoritmos de otimização da matriz de Saaty.

3.3.1 Uso do *software* Voracious-AHP para compensação da inconsistência

Para ajuste da Matriz de Saaty, de modo a determinar uma nova matriz cujo ratio de consistência seja menor que 10%, é utilizado um *software*, brasileiro, *open source*, chamado Voracious-AHP, cuja interface está exibida na Figura 7.

The screenshot shows the Voracious-AHP software interface. It has a title bar that says 'Voracious-AHP - github.com/Valdecy'. The interface is divided into three main sections, each with a numbered label in the top right corner:

- Section 1 (Red box):** 'Number of Criteria:'. It contains radio buttons for values 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, and 9. The value 6 is selected.
- Section 2 (Green box):** 'Deriving Weights:'. It contains two radio buttons: 'Mean Normalization' (selected) and 'Geometric Mean'. Below them is a 'Solve' button and an empty text field.
- Section 3 (Blue box):** 'Allowed Adjustment:'. It contains a dropdown menu set to '1'. Below it are two buttons: 'CR < 0.1' and 'CR = 0.0'. The 'CR = 0.0' button is highlighted.

To the right of these sections are two matrices, each with a 'WEIGHTS' column on the left. The top matrix is labeled 'Original' and has orange headers. The bottom matrix is labeled 'Adjusted' and has green headers. Both matrices are 6x6, with rows and columns labeled C-01 through C-06. The diagonal elements are 1, and the off-diagonal elements are 9. The 'Adjusted' matrix has a 'CR = 0.0' value displayed below it.

Figura 7: Interface do *Software* Voracious-AHP

Fonte: *Software* Voracious-AHP

O *software* em questão, utiliza algoritmos vorazes para mitigar ou eliminar por completo inconsistências na matriz de decisão de Saaty, sem a necessidade de refazer todas os pesos de comparação paritárias, como discutido em Pereira e Costa (2018).

Na Figura 7, no quadrado vermelho indicado em [1], determina-se a quantidade de critérios que serão adentrados na matriz, determinando consequentemente a ordem da matriz em questão. Os valores acima da diagonal principal são adentrados na matriz original (laranja), sendo seus valores recíprocos abaixo da diagonal principal, calculados automaticamente. No quadrado verde, indicado em [2], determina-se o tipo de normalização que a matriz passará, gerando os valores dos pesos na coluna *weights*, esta parte não será usada na análise. Por fim, o ponto chave do *software* se encontra no quadrado azul, indicado em [3], onde é possível determinar o *Allowed Adjustment*, isto é, o ajuste permitido, e acionar o algoritmo para gerar

uma matriz cujo ratio de consistência seja menor que 0,1 ou o mais próximo possível de zero. A matriz ajustada (verde), apresentará em destaque as escalas que foram alteradas.

O ajuste permitido é a variável que determina a faixa de ajuste permitida pelo tomador de decisão. A Tabela 7 apresenta a relação entre as posições das escalas. Um ajuste permitido de valor dois, por exemplo, significa que uma escala original pode ser ajustada em até duas posições acima ou abaixo. Assim, uma escala de 1/2, cuja posição é 7, pode variar entre as escalas 1/4 e 2, localizadas nas posições 5 e 9, respectivamente.

Escala	Posição	Escala	Posição
1/9	0	1	8
1/8	1	2	9
1/7	2	3	10
1/6	3	4	11
1/5	4	5	12
1/4	5	6	13
1/3	6	7	14
1/2	7	8	15
1	8	9	16

Tabela 7: Relação posição e escala para aplicação do *Allowed Adjustment*

Fonte: Adaptado de Pereira e Costa (2018)

Esse ajuste representa uma relação de custo-benefício, pois quanto maior o valor permitido, menor será a inconsistência da matriz final. No entanto, permitir um ajuste muito amplo pode comprometer as informações e ponderações originais do tomador de decisão. Para evitar essa perda excessiva de informação, Pereira e Costa (2014) estabelece que o valor ideal do ajuste é de, no máximo, três posições. Esse limite equilibra flexibilidade e fidelidade às avaliações originais, garantindo um refinamento adequado da matriz sem comprometer sua integridade.

A princípio, foi aplicado o ajuste de uma única posição, para determinar o novo valor do ratio de consistência, como indicado na Figura 8, no entanto, o resultado obtido de 0,2136 demonstrou uma distância considerável do valor requerido inferior a 0,1, ainda assim menor que os 0,33459 originais, indicando um caminho plausível para solução da inconsistência. Assim, partiu-se para a aplicação do ajuste de duas posições, como apresentado na Figura 9, o resultado no entanto ainda não se mostrou satisfatório porém próximo do desejado, com o ratio de consistência passando a valer 0,1307. Na terceira tentativa, foi determinado o ajuste para três posições, como indicado na Figura 10, e o resultado obtido foi exatamente no limiar desejado, com o ratio de consistência passando a valer 0,0953. Com isso, obteve-se a Matriz de Saaty final e consistente que será usada para a priorização da manutenção nas UFVs, visto que

a inconsistência passou a estar limitada dentro das exigências teóricas, não sendo necessário aumentar o ajuste, poupando as informações originais o máximo possível.

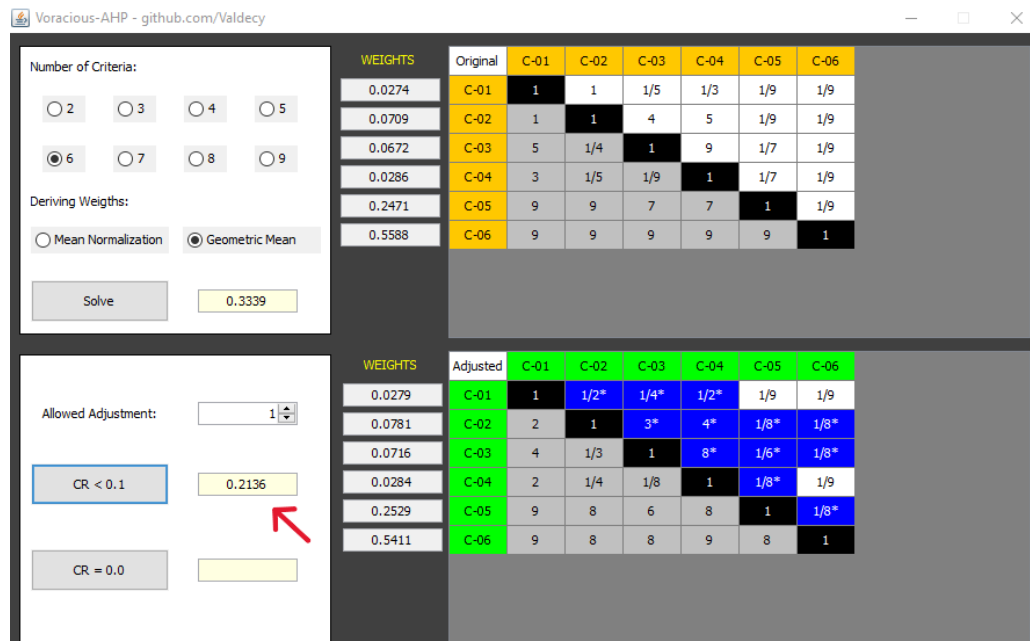


Figura 8: Ratio de consistência para ajuste permitido de uma posição no Voracious-AHP

Fonte: *Software Voracious-AHP*

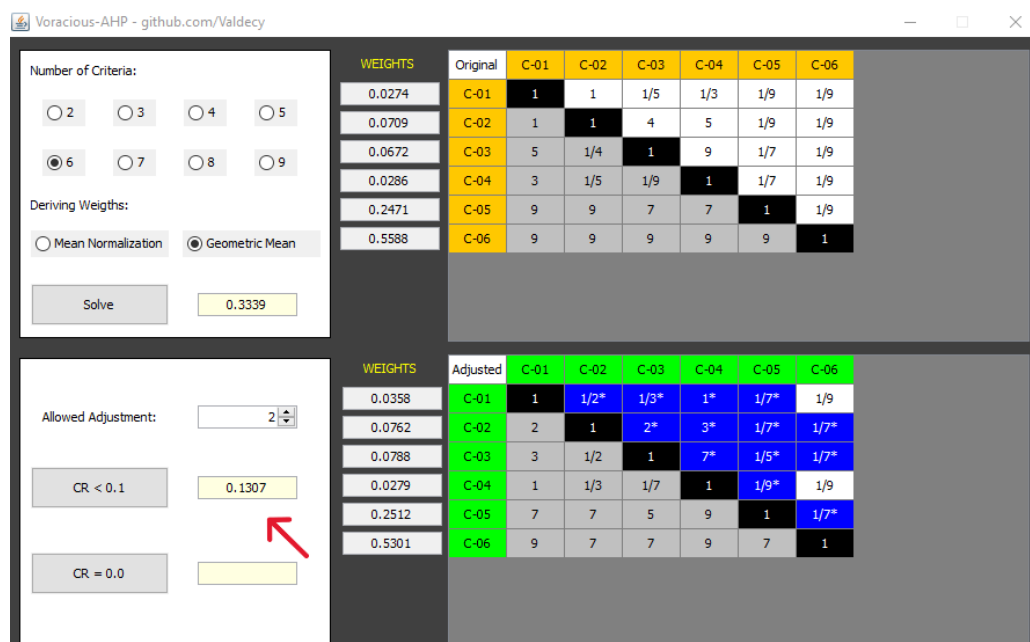


Figura 9: Ratio de consistência para ajuste permitido de duas posições no Voracious-AHP

Fonte: *Software Voracious-AHP*

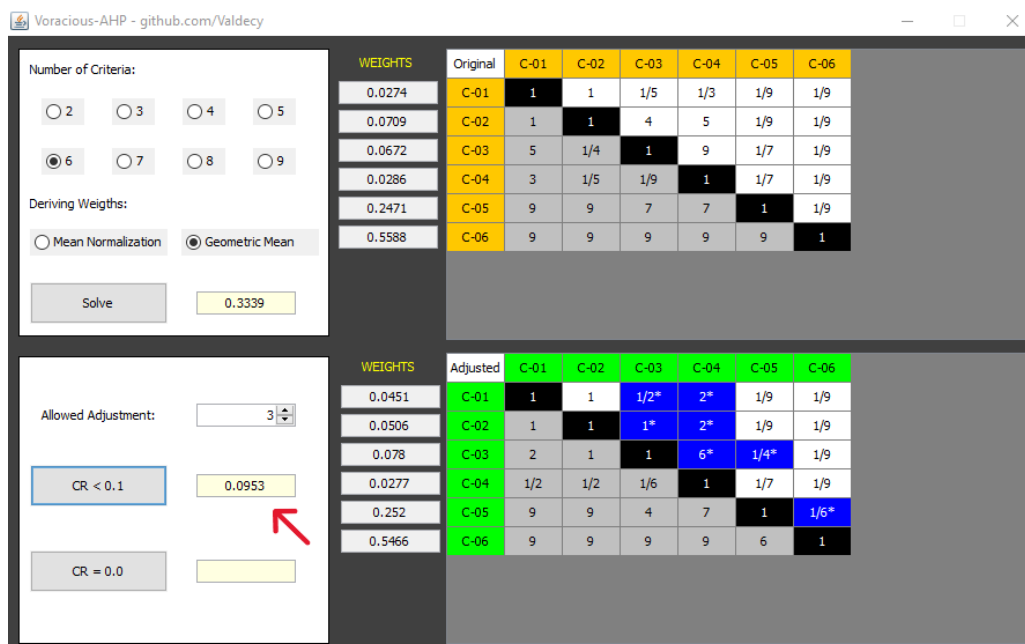


Figura 10: Ratio de consistência para ajuste permitido de três posições no Voracious-AHP

Fonte: *Software* Voracious-AHP

3.3.2 Confirmação da consistência da nova Matriz de Saaty

A nova Matriz de Saaty dos critérios para a priorização de usinas é apresentada na Tabela 8:

	Potência CC	Eficiência	OS Corretivas	OS Preventivas	Usina Desligada	Cliente
Potência CC	1	1	1/2	2	1/9	1/9
Eficiência	1	1	1	2	1/9	1/9
OS Corretivas	2	1	1	6	1/4	1/9
OS Preventivas	1/2	1/2	1/6	1	1/7	1/9
Usina Desligada	9	9	4	7	1	1/6
Cliente	9	9	9	9	9	1

Tabela 8: Matriz de Saaty para os critérios de priorização de UFVs com consistência corrigida

Fonte: O Autor

Aplicando as informações da Tabela 8, no código calculador de autovalores apresentado no Apêndice I, obtêm-se os seguintes autovalores:

$$\lambda = \begin{bmatrix} 6,60147589 \\ 1,76614234 \\ 1,76614234 \\ 0,07154517 \\ 0,90266382 \\ 0,90266382 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Tendo em vista que o maior autovalor é 6,60147589, prossegue-se para o cálculo do índice de consistência utilizando a Equação (2).

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{6,60147589 - 6}{6 - 1} \quad (31)$$

$$IC = 0,120295178$$

Conclui-se os cálculos de consistência calculando o ratio de consistência tendo em vista a expressão matemática exposta na Equação (13) e o valor do índice de consistência aleatória para ordem seis exposto na Tabela 4.

$$RC = \frac{IC}{IR} = \frac{0,120295178}{1,24} \quad (32)$$

$$RC = 0,09701$$

Com isso, conclui-se que a análise feita pelo Voracious-AHP, de fato entregou uma nova matriz que mantém sua consistência abaixo dos 10% requeridos. Com a confirmação analítica, se estabelece a matriz apresentada na Tabela 8 como a matriz definitiva de relação par-a-par dos critérios, e pode-se continuar com a aplicação do método TOPSIS. Para uso futuro, é necessário calcular a Matriz de Saaty Normalizada, usando o princípio apresentado na Equação (5), dividindo os termos pela soma dos termos de sua respectiva coluna, encontrando a matriz exposta na Equação (33).

$$B_{6 \times 6} = \begin{pmatrix} 0,0444 & 0,0465 & 0,0319 & 0,0741 & 0,0105 & 0,0690 \\ 0,0444 & 0,0465 & 0,0638 & 0,0741 & 0,0105 & 0,0690 \\ 0,0889 & 0,0465 & 0,0638 & 0,2222 & 0,0236 & 0,0690 \\ 0,0222 & 0,0233 & 0,0106 & 0,0370 & 0,0135 & 0,0690 \\ 0,4000 & 0,4186 & 0,2553 & 0,2593 & 0,0942 & 0,1034 \\ 0,4000 & 0,4186 & 0,5745 & 0,3333 & 0,8479 & 0,6207 \end{pmatrix} \quad (33)$$

Para encontrar a matriz de médias, basta realizar a média das linhas da matriz de termos normalizados, como foi apresentado na Equação (7):

$$W_{6 \times 1} = \begin{pmatrix} 0,0461 \\ 0,0514 \\ 0,0857 \\ 0,0293 \\ 0,2551 \\ 0,5325 \end{pmatrix} \quad (34)$$

Com isso, torna-se possível o prosseguimento com o método de priorização.

3.4 Implementação da Matriz de Decisão do TOPSIS

Como demonstrado na introdução teórica sobre o método do TOPSIS, o primeiro passo é montar a Matriz de Decisão que reúne os dados quantitativos e qualitativos das usinas, apresentados na Tabela 5. Dados quantitativos serão inseridos na matriz normalmente, já os dados qualitativos precisam ser tratados de modo a poderem passar pelo processo matemático requerido pelo método. A forma encontrada e recomendada para tal transformação é a atribuição de valores de acordo com a expressividade da alternativa.

Duas das colunas são preenchidas com dados qualitativos, a primeira trata do status de operação das usinas, sendo composta por três alternativas: a usina pode estar desligada para tratamento da vacância de clientes, nesse caso será atribuído um valor baixo para representação de tal dado, como o número um; A usina pode estar parcialmente desligada, como nos casos de usinas de geração compartilhada, e nesse caso devem receber uma prioridade média, uma vez que ainda atende a demanda de energia alguns clientes, o valor usado aqui será cinco; Por fim, usinas completamente ligadas, cuja infraestrutura inteira atende a demanda de clientes, recebem um valor alto de dez. Assim, no instante que a matriz for ponderada e cada critério relacionado com seu respectivo peso, a ordem de relevância das usinas será mantida para critério do status de seu funcionamento.

De forma similar, a segunda coluna lida com a propriedade das usinas, isto é, se são usinas próprias do Grupo Atlas, ou se são usinas de terceiros, cuja manutenção é pautada em contrato. Nesse caso, usinas de terceiros, estas que são a maior prioridade entre as demais, recebem o valor de dez, enquanto usinas do próprias do Grupo recebem o valor de um. A Matriz de Decisão, considerando a transformação dos dados qualitativos para quantitativos, baseada nos dados presentes na Tabela 5, é exibida na Equação (35).

$$X_{5 \times 6} = \begin{array}{c|cccccc} & [\text{MWp}] & [\%] & \text{OS Corretivas} & \text{OS Preventivas} & \text{Status operação} & \text{Propriedade} \\ \hline 1\text{IN} & 6,93 & 102,82 & 4 & 1 & 10 & 10 \\ 1\text{MT} & 6,75 & 112,26 & 5 & 1 & 1 & 1 \\ 2\text{IN} & 6,93 & 105,37 & 0 & 0 & 10 & 1 \\ 2\text{MT} & 3,72 & 95,48 & 0 & 6 & 10 & 1 \\ 3\text{MT} & 2,7 & 83,22 & 4 & 3 & 5 & 1 \end{array} \quad (35)$$

Aplicando a normalização da matriz indicada na Equação (15), encontra-se a Matriz de Decisão Normalizada, exibida na Equação (36).

$$R_{5 \times 6} = \begin{pmatrix} 0,5432 & 0,4584 & 0,5298 & 0,1459 & 0,5538 & 0,9806 \\ 0,5291 & 0,5004 & 0,6623 & 0,1459 & 0,0554 & 0,0981 \\ 0,5432 & 0,4697 & 0,0000 & 0,0000 & 0,5538 & 0,0981 \\ 0,2916 & 0,4256 & 0,0000 & 0,8752 & 0,5538 & 0,0981 \\ 0,2116 & 0,3710 & 0,5298 & 0,4376 & 0,2769 & 0,0981 \end{pmatrix} \quad (36)$$

O próximo passo é encontrar a Matriz de Decisão Ponderada, esta que é resultado do produto escalar da Matriz de Decisão Normalizada, indicada na Equação (36), com a matriz de médias de critérios obtida pelo método AHP exposta na Equação (34), o resultado final da Matriz Ponderada é exibido na Equação (39).

$$V_{ij} = \langle \mathbf{R}_j, \mathbf{W}_i \rangle \quad (37)$$

$$V_{5 \times 6} = \begin{pmatrix} 0,5432 & 0,4584 & 0,5298 & 0,1459 & 0,5538 & 0,9806 \\ 0,5291 & 0,5004 & 0,6623 & 0,1459 & 0,0554 & 0,0981 \\ 0,5432 & 0,4697 & 0,0000 & 0,0000 & 0,5538 & 0,0981 \\ 0,2916 & 0,4256 & 0,0000 & 0,8752 & 0,5538 & 0,0981 \\ 0,2116 & 0,3710 & 0,5298 & 0,4376 & 0,2769 & 0,0981 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0,0461 \\ 0,0514 \\ 0,0857 \\ 0,0293 \\ 0,2551 \\ 0,5325 \end{pmatrix} \quad (38)$$

$$V_{5 \times 6} = \begin{pmatrix} 0,0250 & 0,0236 & 0,0454 & 0,0043 & 0,1413 & 0,5222 \\ 0,0244 & 0,0257 & 0,0567 & 0,0043 & 0,0141 & 0,0522 \\ 0,0250 & 0,0241 & 0,0000 & 0,0000 & 0,1413 & 0,0522 \\ 0,0134 & 0,0219 & 0,0000 & 0,0256 & 0,1413 & 0,0522 \\ 0,0097 & 0,0191 & 0,0454 & 0,0128 & 0,0707 & 0,0522 \end{pmatrix} \quad (39)$$

3.5 Determinação das soluções ideais, cálculo das distâncias euclidianas e obtenção do índice de proximidade

A escolha ideal para a priorização deve ser a pior usina, esta que apresenta os piores dados referentes a cada coluna. Sendo assim, os critérios de potência CC, número de OSs corretivas e preventivas, status de operação e propriedade da usina, são todos critérios de referência crescente, quanto maiores os seus valores, mais prioritários devem ser as usinas, sendo assim a solução ideal para estes critérios são os maiores valores de suas colunas.

O único critério que tem referência decrescente é a eficiência de geração, onde usinas com a menor eficiência é que são as prioritárias à atividades de manutenção, nesse caso, a solução ideal é a usina com o menor valor da coluna. Com esse raciocínio, pode-se montar os vetores de soluções ideais positiva e negativa, indicados em (40).

$$\begin{aligned} A^+ &= \{0,0250, 0,0191, 0,0567, 0,0256, 0,1413, 0,5222\} \\ A^- &= \{0,0097, 0,0257, 0,0000, 0,0000, 0,0141, 0,0522\} \end{aligned} \quad (40)$$

De posse dos vetores das soluções ideais, pode-se calcular as distâncias euclidianas (D^+ e D^-), estas que foram apresentadas nas Equações (24) e (25), e o índice de proximidade de cada usina (C_i), introduzido na Equação (26). Os resultados obtidos são exibidos na Tabela 9,

para efeito de comparação, os índices de proximidade são normalizados via divisão pela soma de todos os termos, de modo a ficar clara a porcentagem de prioridade de cada usina.

Usina	D^+	D^-	C_i	Prioridade [%]
1IN	0,0246	0,4892	0,9522	58,6982
1MT	0,4874	0,0587	0,1076	6,6311
2IN	0,4741	0,1281	0,2127	13,1146
2MT	0,4735	0,1298	0,2152	13,2668
3MT	0,4758	0,0739	0,1345	8,2893

Tabela 9: Resultado da priorização das usinas de uma base do Mato Grosso através do método AHP-TOPSIS

Em suma, o resultado obtido revela uma decisão razoavelmente intuitiva, a usina de maior prioridade (1IN) é uma das maiores em termos de tamanho da amostra, pertence a terceiros e detém um número alto de ordens de serviço a serem feitas. Nota-se também que usinas cujas características se compensam, por exemplo, usinas de maior porte, ligadas, porém sem nenhuma ordem de serviço e com eficiência alta (2IN) se aproximam da prioridade de usinas também ligadas, porém de menor porte e com eficiência de geração e quantidade de ordens de serviço desfavoráveis (2MT), o que de fato é esperado que o método realize.

Por fim, a usina de menor prioridade (1MT) também é uma escolha plausível de baixa priorização, visto que apesar de ser grande em tamanho e apresentar quantidade significativa de ordens de serviço, ainda assim, por estar desligada e por ser propriedade do Grupo Atlas e não de terceiros, sua prioridade é esperada de ser baixa. Com a implementação comprovada de ser um sucesso para as usinas de uma base do Mato Grosso, pode-se prosseguir com a programação do algoritmo que fará o mesmo ranqueamento, porém em todas as usinas do Grupo Atlas, atendidas pela Operadora.

4 APLICAÇÃO *PYTHON* E RESULTADOS OBTIDOS

A aplicação do método consiste na busca pelo algoritmo mais simples e otimizado, de modo que qualquer alteração necessária seja rapidamente implementada. Por isso, como pode ser visto no Apêndice II, o código realiza passo a passo, todos os pontos discutidos na apresentação teórica com exceção do teste de consistência da matriz de Satty para os critérios, visto que tal atividade é extremamente laborosa e demanda *software* de terceiros. Apesar disso, caso alterações sejam feitas na matriz de critérios e em uma nova coluna na planilha de entrada de dados, o programa automaticamente detectará uma nova coluna a ser analisada e implementará a análise completa da mesma forma.

O formato da planilha *Excel* para entrada de dados é extremamente simples e remete aos mesmos formatos de dados apresentados durante a apresentação teórica do método. Para efeito de visualização dos resultados, segue as tabelas indicando os resultados de priorização para as diversas regionais pertencentes ao Grupo Atlas.

Sigla da Usina	Potência (MWp)	Eficiência de geração	OS corretivas	OS preventivas	Desligada?	Propriedade (Terceira, Própria)	TOPSIS (%)
1PR	2,71	108,62%	7	7	Não	Própria	39,7230
2PR	4,06	108,81%	6	2	Não	Própria	34,0145
3PR	6,75	107,44%	3	6	Não	Própria	26,2624

Tabela 10: Priorização das usinas da regional de Alta Floresta

Sigla da Usina	Potência (MWp)	Eficiência de geração	OS corretivas	OS preventivas	Desligada?	Propriedade (Terceira, Própria)	TOPSIS (%)
DFH	3,09	110,43%	7	3	Não	Própria	25,6161
1BV	2,77	101,77%	7	1	Não	Própria	23,0760
BST	2,69	103,51%	6	2	Não	Própria	22,2713
ADT	2,95	98,20%	2	8	Não	Própria	14,3105
ACR	3,70	107,14%	1	4	Não	Própria	8,0026
DMP	3,30	105,50%	2	1	Não	Própria	5,9338
DLP	2,73	104,42%	1	0	Não	Própria	0,7898

Tabela 11: Priorização das usinas da regional de Belo Horizonte

Sigla da Usina	Potência (MWp)	Eficiência de geração	OS corretivas	OS preventivas	Desligada?	Propriedade (Terceira, Própria)	TOPSIS (%)
1MR	4,07	110,88%	7	6	Não	Própria	31,8882
1CG	3,70	100,56%	7	6	Não	Própria	31,3000
1CX	6,75	105,64%	2	3	Não	Própria	13,2928
2CG	3,70	103,24%	2	8	Não	Própria	12,9267
1AC	3,39	104,69%	1	8	Não	Própria	9,3024
3CG	3,70	102,68%	0	1	Não	Própria	1,2899

Tabela 12: Priorização das usinas da regional de Campo Grande

Sigla da Usina	Potência (MWp)	Eficiência de geração	OS corretivas	OS preventivas	Desligada?	Propriedade (Terceira, Própria)	TOPSIS (%)
2NU	3,03	94,98%	8	6	Não	Terceira	22,3772
1NS	3,16	100,19%	7	0	Não	Terceira	21,6248
2NS	3,16	98,45%	4	4	Não	Terceira	21,1498
1NU	3,04	96,72%	4	4	Não	Terceira	21,1444
08V	3,75	102,17%	7	7	Não	Própria	2,1081
AFL	3,33	104,82%	7	3	Não	Própria	1,9356
ILR	2,49	103,25%	7	3	Não	Própria	1,9158
1FO	3,05	103,21%	6	7	Não	Própria	1,7723
IPU	2,84	120,48%	5	8	Não	Própria	1,5408
25V	3,39	108,24%	5	6	Não	Própria	1,4301
2FO	3,05	104,44%	4	7	Não	Própria	1,2286
ACM	3,39	103,23%	3	8	Não	Própria	1,1816
2IP	2,65	101,57%	2	4	Não	Própria	0,5908

Tabela 13: Priorização das usinas da regional de Campos Altos

Sigla da Usina	Potência (MWp)	Eficiência de geração	OS corretivas	OS preventivas	Desligada?	Propriedade (Terceira, Própria)	TOPSIS (%)
FSV	3,70	105,20%	8	6	Não	Própria	39,4839
CEV	1,51	90,63%	6	8	Não	Própria	29,8689
16V	3,39	115,55%	4	1	Não	Própria	20,8923
19V	3,39	108,79%	0	6	Não	Própria	9,7548

Tabela 14: Priorização das usinas da regional de Capitão Enéas

Sigla da Usina	Potência (MWp)	Eficiência de geração	OS corretivas	OS preventivas	Desligada?	Propriedade (Terceira, Própria)	TOPSIS (%)
1BN	3,34	104,03%	8	8	Não	Própria	14,5458
3BN	3,34	104,15%	7	6	Não	Própria	13,6165
2OP	6,77	104,17%	6	3	Não	Própria	12,5460
4BN	3,34	103,60%	6	1	Não	Própria	11,1538
3OP	3,38	104,70%	5	7	Não	Própria	10,7841
1OP	6,78	105,54%	4	4	Não	Própria	9,1908
2BN	3,34	106,86%	4	7	Não	Própria	9,0249
1DN	5,54	91,64%	3	8	Não	Própria	7,9980
1RV	6,77	113,13%	3	2	Não	Própria	7,0114
1CV	6,78	111,89%	1	0	Não	Própria	3,7913
ACR	3,38	107,14%	0	0	Não	Própria	0,3374

Tabela 15: Priorização das usinas da regional de Cuiabá

Sigla da Usina	Potência (MWp)	Eficiência de geração	OS corretivas	OS preventivas	Desligada?	Propriedade (Terceira, Própria)	TOPSIS (%)
1CP	6,78	113,29%	6	7	Não	Própria	23,3989
1GI	4,07	115,17%	6	8	Não	Própria	21,2307
2CP	4,05	110,80%	5	6	Não	Própria	19,2267
1QS	4,16	110,09%	3	0	Não	Própria	11,2445
2IT	4,07	96,81%	1	8	Não	Própria	7,2067
1PP	6,78	105,25%	1	4	Não	Própria	6,1316
1BY	6,93	103,02%	0	4	Não	Própria	4,5962
1IT	4,07	106,97%	1	0	Não	Própria	3,9211
ANV	5,42	104,21%	0	3	Não	Própria	3,0436

Tabela 16: Priorização das usinas da regional de Dourados

Sigla da Usina	Potência (MWp)	Eficiência de geração	OS corretivas	OS preventivas	Desligada?	Propriedade (Terceira, Própria)	TOPSIS (%)
3AJ	3,33	106,69%	7	5	Não	Própria	21,7605
2EL	2,59	101,47%	7	0	Não	Própria	18,5595
1AJ	1,69	115,08%	6	8	Não	Própria	18,3750
ELM	3,39	96,83%	5	6	Não	Própria	18,3009
ACM	6,47	103,49%	1	7	Não	Própria	12,6780
1AP	3,39	114,73%	1	2	Não	Própria	5,5809
2AJ	1,54	110,21%	2	2	Não	Própria	4,7452

Tabela 17: Priorização das usinas da regional de Paraisópolis

Sigla da Usina	Potência (MWp)	Eficiência de geração	OS corretivas	OS preventivas	Desligada?	Propriedade (Terceira, Própria)	TOPSIS (%)
1PQ	6,78	102,00%	6	8	Não	Própria	28,1426
1BP	4,07	103,09%	4	4	Não	Própria	17,9374
1AS	6,78	107,62%	4	2	Não	Própria	17,8774
1DI	6,78	107,86%	3	8	Não	Própria	14,9873
2BP	4,07	107,16%	2	1	Não	Própria	8,9035
1BG	6,78	104,26%	0	8	Não	Própria	6,0398
2AS	6,10	104,29%	1	4	Não	Própria	5,8131
2BG	4,07	104,21%	0	1	Não	Própria	0,2990

Tabela 18: Priorização das usinas da regional de São Paulo

Sigla da Usina	Potência (MWp)	Eficiência de geração	OS corretivas	OS preventivas	Desligada?	Propriedade (Terceira, Própria)	TOPSIS (%)
1IN	6,93	102,82%	4	1	Não	Terceira	58,6982
2MT	3,72	95,48%	0	6	Não	Própria	13,2668
2IN	6,93	105,37%	0	0	Não	Própria	13,1146
3MT	2,70	83,22%	4	3	Parcial	Própria	8,2893
1MT	6,75	112,26%	5	1	Sim	Própria	6,6311

Tabela 19: Priorização das usinas da regional de Sinop

Sigla da Usina	Potência (MWp)	Eficiência de geração	OS corretivas	OS preventivas	Desligada?	Propriedade (Terceira, Própria)	TOPSIS (%)
1BC	5,05	107,56%	5	8	Não	Terceira	31,6695
2BC	5,90	108,48%	2	6	Não	Terceira	30,6021
1IM	2,85	101,95%	7	5	Não	Própria	2,7439
1NP	3,29	121,34%	7	2	Não	Própria	2,7229
2JP	0,63	91,51%	7	7	Não	Própria	2,7189
2DJ	6,09	107,71%	6	1	Não	Própria	2,7048
AAR	2,74	110,98%	7	0	Não	Própria	2,6808
BRU	2,48	105,16%	7	2	Não	Própria	2,6779
1GM	5,88	97,13%	5	5	Não	Própria	2,4648
12	0,77	123,66%	6	6	Não	Própria	2,3481
RST	6,11	98,84%	3	6	Não	Própria	2,0642
ACJ	0,09	108,10%	5	6	Não	Própria	2,0123
2NP	3,11	104,33%	4	0	Não	Própria	1,7323
AMR	0,10	100,01%	4	6	Não	Própria	1,6881
CMT	3,24	112,15%	2	7	Não	Própria	1,3974
1BU	3,11	105,66%	2	7	Não	Própria	1,3843
2IM	3,32	117,13%	1	8	Não	Própria	1,3173
3BC	2,38	104,52%	2	5	Não	Própria	1,1609
1MS	2,74	100,58%	2	1	Não	Própria	1,0876
IRT	3,39	103,28%	1	1	Não	Própria	0,9991
2GP	0,85	93,25%	1	7	Não	Própria	0,9707
CMR	2,70	112,24%	0	4	Não	Própria	0,8521

Tabela 20: Priorização das usinas da regional de Uberlândia

Note que os resultados práticos do programa para a base de Sinop, indicados na Tabela 19, coincidiram com grau extremamente satisfatório em relação ao exemplo teórico realizado, cujos resultados estão expostos na Tabela 9.

5 CONCLUSÃO

No geral, pode-se concluir que a ferramenta integrada AHP-TOPSIS é uma poderosa auxiliadora em diversos processos de tomada de decisão, sendo amplamente utilizada não apenas no setor da engenharia elétrica, como na grande disciplina de engenharia como um todo. Esta utiliza a matriz de Saaty do *Analytic Hierarchy Process* para relacionar os critérios e seus pesos, seguida pela utilização da *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* para tratar os dados quantitativos e qualitativos, de modo a determinar a escolha a ser tomada.

Neste trabalho, foi explorado o uso de tal ferramenta para priorização de atividades de manutenção em usinas solares fotovoltaicas, sendo o resultado dessa aplicação bastante satisfatório, uma vez que traz consigo a intuição do processo de decisão feito por humanos, implementada especialmente na construção da matriz de relacionamento de pesos entre critérios do AHP.

Apesar de robusto, servindo para priorizar regionais com uma gama diversa de usinas a serem atendidas, o método possui uma única falha que o torna engessado: a consistência. Novas regionais podem ser cadastradas na planilha de entrada de dados, sem que o programa ofereça qualquer resistência. No entanto, a situação se torna bem mais complexa quando o tópico em questão é a inserção de novos critérios a serem utilizados para ponderar na priorização.

Isso ocorre porque a fraqueza do método está justamente na inconsistência humana em determinar pesos que sejam coerentes entre si. A mera inserção de um novo critério impacta na consistência de todos os outros critérios que, até então, eram consistentes. Para isso, é necessário um cuidado especial, de modo que, ao se desejar inserir novos critérios, a nova matriz de Saaty passe novamente pela análise de consistência, aqui neste trabalho tratada no *software* Voracious-AHP, sendo necessário também, caso sejam utilizados *softwares* para correção dos pesos, que o grau de ajuste permitido não ultrapasse três, para que não haja perda de informações no processo.

Caso a checagem da consistência não seja feita ou, se feita, não seja satisfatória, o tomador de decisão estará se baseando em resultados de priorização que não condizem com o equilíbrio matemático tão necessário para o funcionamento do AHP-TOPSIS. Tendo este ponto sido superado, o método apresenta-se como uma ótima maneira de trazer uma abordagem intuitiva, confiável e padronizável para a tomada de decisões complexas.

APÊNDICE I - CÁLCULO DOS AUTOVALORES DA MATRIZ DE SAATY

```
1 import numpy as np
2 from numpy import linalg as LA
3
4 A = np.array([
5     [1, 1, 1/5, 1/3, 1/9, 1/9],
6     [1, 1, 4, 5, 1/9, 1/9],
7     [5, 1/4, 1, 9, 1/7, 1/9],
8     [3, 1/5, 1/9, 1, 1/7, 1/9],
9     [9, 9, 7, 7, 1, 1/9],
10    [9, 9, 9, 9, 9, 1]
11 ])
12
13 e_vals, e_vecs = LA.eig(A) # Uso da função que determina autovalores e autovetores
14
15 e_vals_magnitude = np.abs(e_vals) # Conversão de possíveis autovalores complexos para seus
16     módulos
17 print(e_vals_magnitude)
```

APÊNDICE II - ALGORITMO DE PRIORIZAÇÃO USANDO AHP-TOPSIS

```

1
2 import math
3 import numpy as np
4 import xlwings as xw
5
6 def quantifica (dados,M): #Função que quantifica dados qualitativos
7     N = len(dados)
8     for i in range (N):
9         for j in range (M):
10             if dados[i,j] == 'Não': dados[i,j] = 10
11             elif dados[i,j] == 'Sim': dados[i,j] = 1
12             elif dados[i,j] == 'Parcial': dados[i,j] = 5
13             elif dados[i,j] == 'Própria': dados[i,j] = 1
14             elif dados[i,j] == 'Terceira': dados[i,j] = 10
15             else: continue
16     return dados
17
18 def normaliza_Satty (matriz): #Função que faz a normalização e média da matriz de critérios
19     N = len(matriz)
20     matriz_aux = np.zeros((N,N))
21     #Coluna por coluna, é somado todos os itens e dividido esses itens pela soma total da
22     #coluna
23     for i in range(N):
24         soma_da_coluna = np.sum(matriz[:, i])
25         matriz_aux[:, i] = matriz[:, i] / soma_da_coluna
26     #Linha por linha, é tirada a média
27     media = []
28     for i in range (N):
29         media.append(np.sum(matriz_aux[i,:])/N)
30     media = np.array(media).reshape(-1, 1)
31     return media
32
33 def normaliza_TOPSIS (matriz,M): #Função que faz a normalização e média da matriz de decisão
34     #M é número de colunas
35     N = len(matriz)
36     matriz_aux = np.zeros((N,M))
37     matriz = matriz.astype(float)
38     for j in range(M):
39         soma = 0
40         for i in range(N):
41             soma += (matriz[i,j])**2
42         soma = math.sqrt(soma)
43         for i in range(N):
44             matriz_aux[i,j] = matriz[i,j] / soma
45     return matriz_aux
46
47 def multiplicacao_matrizes(matriz, criterio): #Multiplica a matriz de decisão ponderada pela
48     #matriz de média dos critérios
49     n_linhas = len(matriz)
50     n_colunas = len(criterio)
51     matriz_aux = np.zeros((n_linhas,n_colunas))
52     criterio_aux = criterio.reshape(1, len(criterio))
53     matriz_aux = matriz * criterio_aux
54     return matriz_aux
55
56 def solucoes(matriz,n_colunas,tipo):
57     pos = np.zeros((1,n_colunas))
58     neg = np.zeros((1,n_colunas))
59     for j in range (n_colunas):
60         coluna = matriz[:,j]
61         if tipo[j] == "+":
62             pos[0,j] = np.max(coluna)
63             neg[0,j] = np.min(coluna)
64         elif tipo[j] == "-":
65             pos[0,j] = np.min(coluna)
66             neg[0,j] = np.max(coluna)
67     return pos, neg
68
69 def acha_prioridade(ponderada, n_colunas, pos,neg):
70     prioridade = []
71     n_linhas = len(ponderada)
72     for i in range (n_linhas):
73         soma_positiva = 0
74         soma_negativa = 0
75         for j in range (n_colunas):
76             soma_positiva += (ponderada[i,j] - pos[0,j])**2
77             soma_negativa += (ponderada[i,j] - neg[0,j])**2
78             soma_positiva = math.sqrt(soma_positiva) #Distância
79             soma_negativa = math.sqrt(soma_negativa) #Distância
80             soma_positiva = math.sqrt(soma_positiva) #Distância
81             soma_negativa = math.sqrt(soma_negativa) #Distância
82             Ci = soma_negativa / (soma_positiva + soma_negativa)
83             prioridade.append(Ci)
84     return prioridade

```

```

81
82 def primaria(endereco, nome): #Função principal que recebe os dados e trata as matrizes
83
84     # Matriz de Satty relacionando os critérios e suas importâncias par a par
85     # Potencia CC, Eficiência, OS Corretivas, OS Preventivas, Usina Desligada?, Cliente
86     # Caso necessário inserir outro critério, testar consistência com o uso do
87     # Voracious-AHP, disponível em:
88     # https://github.com/Valdecy/Voracious-AHP
89
90     matriz_Satty_criterios = np.array([
91         [1, 1, 0.5, 2, 1/9, 1/9],
92         [1, 1, 1, 2, 1/9, 1/9],
93         [2, 1, 1, 6, 0.25, 1/9],
94         [0.5, 0.5, 1/6, 1, 1/7, 1/9],
95         [9, 9, 4, 7, 1, 1/6],
96         [9, 9, 9, 9, 9, 1]
97     ])
98
99     tipo_de_criterio = ['+', '-', '+', '+', '+', '+']
100
101     #df = pd.read_excel(endereco, sheet_name=Planilha[1])
102     #Extraí dados da planilha para cada regional
103     wb = xw.Book(endereco)
104     sheet = wb.sheets[nome]
105     data = sheet.range('D2').expand().value # Ajusta automaticamente ao intervalo
106     #df = pd.DataFrame(data[1:], columns=data[0])
107     data = quantifica(np.array(data), len(matriz_Satty_criterios))
108
109     #Constrói a matriz de médias dos critérios de Satty
110     criterios_media = normaliza_Satty(matriz_Satty_criterios)
111
112     #Normaliza a matriz de decisão do TOPSIS
113     matriz_decisao_normalizada = normaliza_TOPSIS(data, len(matriz_Satty_criterios))
114
115     #Multiplica a matriz de decisão normalizada pela média dos critérios
116     matriz_decisao_ponderada = multiplicacao_matrizes (matriz_decisao_normalizada,
117                                                         criterios_media)
118
119     #Encontra as soluções positivas e negativas para cálculo das distâncias euclidianas
120     sol_positiva, sol_negativa =
121     solucoes(matriz_decisao_ponderada, len(matriz_Satty_criterios), tipo_de_criterio)
122
123     #Cálculo das distâncias euclidianas e coeficiente de proximidade
124     prioridade_final =
125     acha_prioridade(matriz_decisao_ponderada, len(matriz_Satty_criterios), sol_positiva,
126                     sol_negativa)
127     prioridade_final = np.array(prioridade_final) / sum(prioridade_final)
128
129     # Mudança no formato do array apenas
130     prioridade_final = np.array(prioridade_final).reshape(-1, 1)
131
132     # Parte do código que printa a prioridade na planilha da respectiva regional, coluna
133     # J, até o momento do desenvolvimento, é a que detém os valores de AHP, mudar caso
134     # necessário
135     wb = xw.Book(endereco)
136     sheet = wb.sheets[nome]
137     # Insere os valores do array na coluna J a partir de J2
138     for idx in range (len(prioridade_final)):
139         sheet.range(f'J{idx+2}').value = 100 * float(prioridade_final[idx,0])
140     return
141
142 def main():
143     # Abertura do arquivo
144     Planilha = ["UDI", "CA", "MT-S", "MT-C", "MT-P", "SP", "MS-CG", "MS-D", "BH", "BH-P", "BH-C"] #
145     # Adicionar novas regionais caso necessário
146     endereco = r'C:\Users\natha\OneDrive\Documents\Faculdade\TCC\Implementação\V2_Insumo
147     de indicadores.xlsx'
148
149     for nome in Planilha:
150         primaria(endereco, nome)
151
152 if __name__ == "__main__":
153     main()
154

```

REFERÊNCIAS

AMOEDO, M.M.; MODARRES, M. A structured methodology for identifying performance metrics and monitoring maintenance effectiveness. *In: RAMS '06. ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2006*. [S. l.]: IEEE, 2006. p. 239–246. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/RAMS.2006.1677381>.

ANTOSZ, K; RATNAYAKE, R.M.C. Machinery classification and prioritization: Empirical models and AHP based approach for effective preventive maintenance. *In: 2016 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND ENGINEERING MANAGEMENT (IEEM)*. [S. l.]: IEEE, dez. 2016. p. 1380–1386. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/IEEM.2016.7798104>.

ATTANAYAKE, M.S.R.H.A.; CHANDIMA, R. M.; MARKESSET, T. Functional Failure Criticality Assessment and Control of Power Distribution Systems: Failure Prioritization Using AHP. *IEEE Access*, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 12, p. 72968–72982, 2024. ISSN 2169-3536. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3403030>.

AYDIN, F.; GUMUS, B. Determining Optimal SVC Location for Voltage Stability Using Multi-Criteria Decision Making Based Solution: Analytic Hierarchy Process (AHP) Approach. *IEEE Access*, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 9, p. 143166–143180, 2021. ISSN 2169-3536. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3121196>.

AZHAR, N.A. *et al.* Selecting Communication Technologies for an Electrical Substation Based on the AHP. *IEEE Access*, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 11, p. 110724–110735, 2023. ISSN 2169-3536. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3321922>.

BAHRAMI, S.; RASTEGAR, M.; DEHGHANIAN, P. An FBWM-TOPSIS Approach to Identify Critical Feeders for Reliability Centered Maintenance in Power Distribution Systems. *IEEE Systems Journal*, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 15, n. 3, p. 3893–3901, set. 2021. ISSN 2373-7816. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/JSYST.2020.3014649>.

BERNARDON, D.P. *et al.* AHP Decision-Making Algorithm to Allocate Remotely Controlled Switches in Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 26, n. 3, p. 1884–1892, jul. 2011. ISSN 1937-4208. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2011.2119498>.

BIAN, D.; PIPATTANASOMPORN, M.; RAHMAN, S. A human expert-based approach to electrical peak demand management. *In: 2015 IEEE POWER AMP; ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING*. [S. l.]: IEEE, jul. 2015. p. 1–1. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/PESGM.2015.7286112>.

DEHGHAN-DEHNAVI, S. *et al.* Decision-Making Tree Analysis for Industrial Load Classification in Demand Response Programs. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 57, n. 1, p. 26–35, jan. 2021. ISSN 1939-9367. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2020.3032932>.

DEHGHANIAN, P. *et al.* Critical Component Identification in Reliability Centered Asset Management of Power Distribution Systems Via Fuzzy AHP. **IEEE Systems Journal**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 6, n. 4, p. 593–602, dez. 2012. ISSN 2373-7816. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/JSYST.2011.2177134>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026 (PDE 2026)**. [S. l.]: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2026. Disponível em: <https://bit.ly/3m6eApM>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Relatório de Balanço Energético Nacional 2023 (BEN 2023)**. [S. l.]: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2023. Disponível em: <https://bit.ly/3meo1tR>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Relatório de Balanço Energético Nacional 2024 (BEN 2024)**. [S. l.]: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2024. Disponível em: <https://bit.ly/3Y9sFzY>.

GHARAKHEILI, M.A.; FOTUHI-FIRUZABAD, M.; DEHGHANIAN, P. A New Multiattribute Decision Making Support Tool for Identifying Critical Components in Power Transmission Systems. **IEEE Systems Journal**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 12, n. 1, p. 316–327, mar. 2018. ISSN 2373-7816. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/JSYST.2015.2500262>.

GIACOMO, M.G.; CONCETTA, M.L.F. Combined fuzzy TOPSIS and AHP-based methodology for the prioritization of maintenance key performance indicators: Application to an oil refinery plant. *In: 2017 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM RELIABILITY AND SAFETY (ICSRS)*. [S. l.]: IEEE, dez. 2017. p. 337–342. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/ICSRS.2017.8272845>.

GUARINO, S. *et al.* A Spatial Decision Support System for Prioritizing Repair Interventions on Power Networks. **IEEE Access**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 11, p. 34616–34629, 2023. ISSN 2169-3536. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3264686>.

GÜNER, G.G.; SAKAR, C.T.; YET, B. A Multicriteria Method to Form Optional Preventive Maintenance Plans: A Case Study of a Large Fleet of Vehicles. **IEEE Transactions on Engineering Management**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 70, n. 6, p. 2153–2164, jun. 2023. ISSN 1558-0040. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/TEM.2021.3072835>.

HANNAH, R.; PABLO, R. Electricity Mix. **Our World in Data**, 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>.

IMAM, A. A.; ABUSORRAH, A. M.; MARZBAND, M. Potential of Concentrated Solar Power in the Western Region of Saudi Arabia: A GIS-Based Land Suitability Analysis and Techno-Economic Feasibility Assessment. **IEEE Access**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 12, p. 1570–1598, 2024. ISSN 2169-3536. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3344752>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Share of renewable electricity generation by technology, 2000-2030**. [S. l.: s. n.], 2024. IEA, Paris. Licence: CC BY 4.0. Disponível em: <https://encurtador.com.br/0SwBf>.

ISLAM, M.R. *et al.* Site suitability assessment for solar power plants in Bangladesh: A GIS-based analytical hierarchy process (AHP) and multi-criteria decision analysis (MCDA) approach. **Renewable Energy**, Elsevier BV, v. 220, p. 119595, jan. 2024. ISSN 0960-1481. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2023.119595>.

JÚNIOR, A.L.N. *et al.* Comparativo entre as metodologias MCDA-C, DEA e AHP. **Revista Da FAE**, v. 18, n. 1, p. 6–19, 2015. Disponível em: <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/27>.

KISER, L.; OTERO, L.D. Using AHP to Choose Optimal Nuclear Power Plant Design. *In*: **2021 IEEE INTERNATIONAL SYSTEMS CONFERENCE (SYSCON)**. [S. l.]: IEEE, abr. 2021. p. 1–6. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/SysCon48628.2021.9447095>.

KONG, Q.; SIAUW, T.; BAYEN, A. **Python programming and Numerical Methods: A Guide for Engineers and Scientists**. en. Academic Press, San Diego, CA, nov. 2020.

LIN, Zhiling *et al.* Application of Analytic Hierarchy Process in Power Lines Maintenance. *In*: **2006 6TH WORLD CONGRESS ON INTELLIGENT CONTROL AND AUTOMATION**. [S. l.]: IEEE, 2006. p. 7596–7599. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/WCICA.2006.1713443>.

LIU, N. *et al.* Security Assessment for Communication Networks of Power Control Systems Using Attack Graph and MCDM. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 25, n. 3, p. 1492–1500, jul. 2010. ISSN 1937-4208. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2033930>.

MA, X.Y. *et al.* Scenario-Based Multiobjective Decision-Making of Optimal Access Point for Wind Power Transmission Corridor in the Load Centers. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 4, n. 1, p. 229–239, jan. 2013. ISSN 1949-3037. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/TSTE.2012.2214791>.

MAIA, W. *et al.* Evaluation of Operational Risk in Power Substations and Its Rational Reduction on the Basis of Multicriteria Allocating Resources. **IEEE Access**, Institute of

Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 9, p. 149383–149397, 2021. ISSN 2169-3536. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3124529>.

MENDONÇA, T.C *et al.* Prioritization of maintenance equipment employing multicriteria decision aid. *In: 2018 ANNUAL IEEE INTERNATIONAL SYSTEMS CONFERENCE (SYSCON)*. [S. l.]: IEEE, abr. 2018. p. 1–6. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/SYSCON.2018.8369552>.

MUCHIRI, P. N. *et al.* Empirical analysis of maintenance performance measurement in Belgian industries. **International Journal of Production Research**, Informa UK Limited, v. 48, n. 20, p. 5905–5924, out. 2009. ISSN 1366-588X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/00207540903160766>.

MUKHERJEE, K. Analytic hierarchy process and technique for order preference by similarity to ideal solution: a bibliometric analysis “from” past, present and future of AHP and TOPSIS. **International Journal of Intelligent Engineering Informatics**, Inderscience Publishers, v. 2, n. 2/3, p. 96, 2014. ISSN 1758-8723. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1504/IJIEI.2014.066210>.

NIU, X.; SONG, Y.; ZHU, H. Data-Driven Decision Aids for Purchasing Battery Electric Vehicles Based on PROMETHEE-II Methodology. **IEEE Access**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 12, p. 27931–27946, 2024. ISSN 2169-3536. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3367365>.

PEREIRA, V.; COSTA, H.G. AHP Inconsistency reduction through two greedy algorithms application. **California Digital Library (CDL)**, mar. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.31224/osf.io/bhga9>.

PEREIRA, V.; COSTA, H.G. Nonlinear programming applied to the reduction of inconsistency in the AHP method. **Annals of Operations Research**, Springer Science e Business Media LLC, v. 229, n. 1, p. 635–655, nov. 2014. ISSN 1572-9338. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-014-1750-z>.

PUTRA, J.A.; RAKHMAN, T.; BIDDINIKA, M.K. Selection between AHP and TOPSIS for Academic Information Systems Decision Making Model. *In: PROCEEDINGS OF THE 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCE, ENGINEERING AND SOCIAL SCIENCES*. [S. l.]: SCITEPRESS - Science e Technology Publications, 2019. p. 86–89. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5220/0009878700860089>.

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**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 9, p. 73413–73423, 2021. ISSN 2169-3536. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3080090>.

SAATY, T.L. **Analytic hierarchy process**. en. McGraw Hill Higher Education, Maidenhead, England, set. 1980.

SAATY, T.L. The Sudan Transport Study. **Interfaces**, INFORMS, v. 8, n. 1, p. 37–57, 1977. ISSN 00922102, 1526551X. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/25059578>.

SAROJA, S.; HASEENA, S.; MADAVAN, R. Dissolved Gas Analysis of Transformer: An Approach Based on ML and MCDM. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 30, n. 5, p. 2429–2438, out. 2023. ISSN 1558-4135. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/TDEI.2023.3271609>.

SILVA, F.C.; SOUZA, C.B. A regulação normativa da energia solar no Brasil e sua aplicabilidade em Goiás. **Revista da Faculdade de Direito da UFG**, Universidade Federal de Goiás, v. 48, n. 1, nov. 2024. ISSN 0101-7187. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5216/rfd.v48i1.64858>.

SILVA, I.T.; FRIEDRICH, N.C. *et al.* Políticas públicas de incentivo à geração de energia por fonte solar fotovoltaica no fomento a disseminação da tecnologia no Brasil. **Revista ft**, Revista ft Ltda, p. 38–39, out. 2024. ISSN 1678-0817. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.69849/revistaft/ar10202410170838>.

SIMÕES, J.M.; GOMES, C.F.; YASIN, M.M. A literature review of maintenance performance measurement: A conceptual framework and directions for future research. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, Emerald, v. 17, n. 2, p. 116–137, maio 2011. ISSN 1355-2511. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1108/13552511111134565>.

SOUZA, D. G. B.; SILVA, C. E. S.; SOMA, N. Y. Selecting Projects on the Brazilian R&D Energy Sector: A Fuzzy-Based Approach for Criteria Selection. **IEEE Access**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 8, p. 50209–50226, 2020. ISSN 2169-3536. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2979666>.

SUPRAJA, S.; KOUSALYA, P. A comparative study by AHP and TOPSIS for the selection of all round excellence award. *In*: **2016 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, ELECTRONICS, AND OPTIMIZATION TECHNIQUES (ICEEOT)**. [S. l.]: IEEE, mar. 2016. p. 314–319. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/ICEEOT.2016.7755271>.

TANAKA, H. *et al.* Multiple Criteria Assessment of Substation Conditions by Pair-Wise Comparison of Analytic Hierarchy Process. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 25, n. 4, p. 3017–3023, out. 2010. ISSN 1937-4208. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2048437>.

TSANG, A.H.C. Strategic dimensions of maintenance management. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, Emerald, v. 8, n. 1, p. 7–39, mar. 2002. ISSN 1355-2511. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1108/13552510210420577>.

TZENG, G.H.; HUANG, J.J. **Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications**. Chapman e Hall/CRC, 2011.

VASQUEZ, W.A.; JAYAWEERA, D. Prioritization of Aging Underground Power Distribution Cables for Maintenance Activities. *In: 2020 INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROBABILISTIC METHODS APPLIED TO POWER SYSTEMS (PMAPS)*. [S. l.]: IEEE, ago. 2020. p. 1–6. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/PMAPS47429.2020.9183566>.

WANG, C.N. *et al.* A Two-Stage Multiple Criteria Decision Making for Site Selection of Solar Photovoltaic (PV) Power Plant: A Case Study in Taiwan. **IEEE Access**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 9, p. 75509–75525, 2021. ISSN 2169-3536. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3081995>.

WANG, S. *et al.* Hybrid interval AHP-entropy method for electricity user evaluation in smart electricity utilization. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, Springer Science e Business Media LLC, v. 6, n. 4, p. 701–711, dez. 2017. ISSN 2196-5420. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s40565-017-0355-3>.

WIDIANTA, M. M. D. *et al.* Comparison of Multi-Criteria Decision Support Methods (AHP, TOPSIS, SAW amp; PROMENTHEE) for Employee Placement. **Journal of Physics: Conference Series**, IOP Publishing, v. 953, p. 012116, jan. 2018. ISSN 1742-6596. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/953/1/012116>.