DOI: 10.48011/asba.v2i1.1564

Avaliação do Desempenho de Unidades Geradoras Utilizando o Método AHP

Patrícia de Sousa Oliveira e Fernando Luiz Cyrino Oliveira *
Marcos Tadeu Barros de Oliveira, Elisa Oliveira, **
Lucas Reis Conceição e André Luís Marques Marcato **
Giovani Santiago Junqueira ***

* *Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, RJ, (e-mail: patriciadesousaoliveira@gmail.com, cyrino@puc-rio.br).*
** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, MG (e-mail: oliveira.marcos, elisa.oliveira, lucas.conceicao, andre.marcato}@engenharia.ufjf.br)*
*** *Santo Antônio Energia, Hidroelétrica Santo Antônio, RO, (e-mail: giovani@santoantonioenergia.com.br)*

Abstract: The present work proposes to obtain a ranking of generating units using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method, based on the maintenance indicators of the Santo Antônio Hydroelectric Plant (SAE). The purpose of the generated classification is to provide subsidies to assist maintenance planning, determining the most critical turbines for performing preventive maintenance, in order to increase the availability of equipment, in addition to reducing the probabilities of forced shutdowns for corrective maintenance, impacting factors the plant's Availability Factor (FID). Thus, the main contribution of this work is the application of AHP to classify the SAE generating units, using parameters and real historical data from the plant and hydraulic turbines.

Resumo: O presente trabalho propõe a obtenção de um *ranking* de unidades geradoras com a utilização do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), baseado nos indicadores de manutenção da Usina Hidrelétrica Santo Antônio (SAE). O intuito da classificação gerada é fornecer subsídio para auxiliar o planejamento das manutenções, determinando as turbinas mais críticas para a realização da manutenção preventiva, de forma a aumentar a disponibilidade dos equipamentos, além de reduzir as probabilidades de paradas forçadas para manutenções corretivas, fatores impactantes no Fator de Disponibilidade (FID) da usina. Dessa forma, a principal contribuição deste trabalho é a aplicação do AHP para classificar as unidades geradores da SAE, utilizando parâmetros e dados históricos reais da usina e das turbinas hidráulicas.

Keywords: Analytic Hierarchy Process; Availability Factor; Maintenance.

Palavras-chaves: Análise Hierárquica do Processo; Fator de Disponibilidade; Manutenção; Turbinas Hidráulicas; Usina Hidrelétrica.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui a maior parte da energia elétrica gerada de fontes renováveis, onde a geração por Usinas Hidrelétricas (UHEs) lidera com maior parcela, chegando a 64% da matriz energética brasileira (EPE, 2020). Devido a existência de usinas de grande porte e espalhadas pelo extenso território nacional, foi criado o Sistema Interligado Nacional (SIN), que é um sistema de coordenação e controle, formado pelos subsistemas Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte, proporcionando a transmissão de energia entre os subsistemas e possibilitando um sistema econômico e seguro.

As usinas hidrelétricas conectadas ao SIN e despachadas centralizadamente pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) participam do Mecanismo de Realocação de Energia (MRE), o qual é um mecanismo financeiro que foi criado com o objetivo de compartilhar o risco hidrológico entre os geradores hidrelétricos (ANEEL, 2003). Quando as geradoras assinam o contrato, elas assumem o risco da quantidade que realmente irão gerar de acordo com sua Garantia Física (GF), podendo não gerar a energia suficiente para atender o montante contratado, nesse caso, deverão comprar energia de outros agentes geradores com superavit de energia.

De forma a avaliar o desempenho das usinas, foi criado na Resolução Normativa n° 688/2003 o Fator de Disponibilidade (FID), o qual verifica se as usinas cumpriram os seus requisitos de disponibilidade de geração (ANEEL, 2003), onde seu cálculo leva em consideração a Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada (TEIF) e de Indisponibilidade Programada (IP) como valores de referência, definidos por contrato. Esta foi aprimorada em 2014 através da publicação de uma nova Resolução Normativa n° 614/2014

(ANEEL, 2014). O FID é utilizado para reduzir matematicamente a capacidade da usina, sendo assim, o agente será impactado financeiramente, pois a usina em questão necessitará comprar uma maior quantidade de energia de outros geradores para atender seus requisitos contratuais. Dessa forma, o estudo do FID é de grande importância para as geradoras, já que um desempenho ruim das disponibilidades pode ocasionar grandes impactos negativos no fluxo de caixa.

Assim, devido à relevância do FID para as usinas, diversos trabalhos trazem o assunto como discussão. Inicialmente, destaca-se a dissertação apresentada por Arantes (2010), onde o autor buscou apresentar uma avaliação do impacto do planejamento da manutenção no FID, propondo procedimentos mais adequados para aumentar o indicador de disponibilidade das unidades geradoras, recomendando revisão dos procedimentos de manutenção programada dos equipamentos, além de técnicas de monitoramento preditivo.

Já os estudos apresentados pelos autores Brito (2016), Melo et al. (2016), da Cunha (2015) e Fernandes et al. (2016), discutem o Mecanismo de Realocação de Energia (MRE) frente a crise hídrica enfrentada entre 2014 e 2016. Segundo eles, o MRE não é capaz de mitigar o risco hidrológico, necessitando de uma reformulação no seu funcionamento. Por fim, destaca-se o estudo apresentado por Souza (2019), que trata-se também da Usina de Santo Antônio (UHSN), cujo principal objetivo é analisar todo o processo da questão judicial promovida pela Santo Antônio Energia (SAE), devido sua insatisfação com a apuração do fator de disponibilidade, trazendo detalhes sobre todos os conceitos envolvidos.

Seguindo essa linha de pesquisa, o objetivo deste estudo é apresentar um *ranking* das unidades geradoras da Usina Hidrelétrica de Santo Antônio, levando em consideração indicadores de manutenção e de disponibilidade reais, com a finalidade de encontrar as turbinas com baixo desempenho na usina, priorizando-as para realizar as manutenções preventivas. Em contrapartida as demais turbinas com melhor desempenho serão selecionadas para ficarem a maior parte do tempo em funcionamento. As manutenções serão realizadas principalmente no período de baixa vazão, a qual a flexibilidade é maior, visto que este período é bem definido, característica do Rio Madeira, onde a Usina de Santo Antônio foi construída.

Conforme item 12.8.4 do Edital do Leilão n° 005/2007, os valores de referência da TEIF e IP definidos para a Usina de Santo Antônio foram 0,5 e 0,0%, respectivamente, porém, o que tem ocorrido na prática pela UHSN são índices de indisponibilidade forçada e programada acima do proposto no referido edital de licitação, reduzindo o FID da usina e levando a um impacto financeiro, que já somou cerca de 812 milhões para a Santo Antônio em 2018 (Nascimento, 2020), portanto, estudos relacionados ao FID da usina são de extrema importância para o agente.

Dessa forma, a classificação desenvolvida neste trabalho irá proporcionar ao agente identificar as turbinas mais críticas para a realização da manutenção preventiva através de uma análise global, influenciando principalmente a disponibilidade dos equipamentos e reduzindo as ocorrências de paradas forçadas para manutenções corretivas, fatores impactantes no FID. Para isto, será utilizado o método Multicritério AHP (*Analytic Hierarchy Process*) desenvolvido por Tomas L. Saaty. O método deste modelo foi operacionalizado através da programação utilizando a linguagem livre Python e dados reais da usina hidrelétrica de Santo Antônio.

Por fim, as principais contribuições desse trabalho são:

- Aplicação do método AHP para classificação de turbinas hidráulicas utilizando parâmetros de disponibilidade e manutenção;
- Utilização de dados reais da Usina de Santo Antônio para construção da classificação de turbinas, visando auxiliar o agente na tomada de decisão de manutenções preventivas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fator de Disponibilidade (FID)

A busca pela eficiência também está presente no setor energético e é por esse motivo, o rigor na apuração do indicador Fator de Disponibilidade (FID). O FID encontra-se inicialmente descrito na Resolução Normativa da ANEEL n° 688/2003 e sofreu uma revisão em 2014 e passou a vigorar a partir de outubro de 2014 o descrito na Resolução Normativa da ANEEL n° 614/2014. Através dessas resoluções, são estabelecidas regras para o cálculo da taxa de indisponibilidade de usinas hidrelétricas e termelétricas, que dependem principalmente da potência instalada, do número de horas de desligamento relacionadas as manutenções programadas e forçadas.

As indisponibilidades avaliadas pelo ONS são apurados por meio da Taxa Equivalente de Indisponibilidade Programada (TEIP) e da Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada Apurada (TEIFa). Dessa forma, para cada usina despachada centralizadamente pelo ONS, deverão ser calculados os índices TEIP e TEIFa, mensalmente conforme as Equações 1 e 2, sendo i o índice da unidade geradora em operação comercial, n o número de unidades geradoras em operação comercial e j o índice do mês apurado.

$$TEIP = \frac{\sum_{j=1}^{60}\sum_{i=1}^{n} P_i \cdot (HDP + HEDP)_{ij}}{\sum_{j=1}^{60}\sum_{i=1}^{n} P_i \cdot (HP)_{ij}} \tag{1}$$

$$TEIFa = \frac{\sum_{j=1}^{60}\sum_{i=1}^{n} P_i \cdot (HDF + HEDF)_{ij}}{\sum_{j=1}^{60}\sum_{i=1}^{n} P_i \cdot (HDF + HEDF + HS + HDCE + HRD)_{ij}} \tag{2}$$

Onde:

P	Potência instalada da unidade geradora i;
HDP	Número de horas de desligamento programado da unidade i no mês j;

$HEDP$ Número de horas de equivalentes de desligamento programado da unidade i no mês j (a unidade opera com potência nominal limitada, associada a uma condição programada);
HP Número de horas do período de apuração considerado no mês j para a unidade i;
HDF Número de horas de desligamento forçado da unidade i no mês j;
$HEDF$ Número de horas equivalentes de desligamento forçado da unidade i no mês j (a unidade opera com potência nominal limitada, associada a uma condição forçada);
HS Número de horas em serviço da unidade i no mês j (número de horas equivalentes em serviço somado ao número de horas em que a unidade opera sincronizada ao sistema, sem restrição de potência);
HRD Número de horas de reserva desligada da unidade i no mês j (a unidade não está em serviço por interesse sistêmico, apesar de disponível para operação);
$HDCE$ Número de horas desligada por condições externas da unidade i no mês j (a unidade não está em serviço por condições externas às suas instalações).

Analisando as equações é possível notar quais são os índices passíveis de alterações para que as taxas sejam menores. Na Equação 1, que indica o cálculo da TEIP, os índices envolvidos no numerador são associados as horas de manutenção programadas ou preventivas das Unidades Geradoras (UGs) e, portanto, podem ser modificadas com o devido planejamento. Da mesma maneira, na Equação 2, relacionada a TEIFa, os índices do numerador, HDF e HEDF, que indicam as manutenções forçadas, conhecidas como manutenções corretivas, não são flexíveis a alterações, porém, com o uso de ferramentas que auxiliam na gestão da manutenção, realizando manutenções preventivas, poderão diminuir a probabilidade de parada. Após os índices de TEIP e TEIFa apurados, é possível encontrar o valor do FID, como mostram as Equações 3, 4 e 5.

$$IDv = (1 - TEIP) \times (1 - TEIFa) \tag{3}$$

$$ID = (1 - IP) \times (1 - TEIF) \tag{4}$$

$$FID = \frac{IDv}{ID} \tag{5}$$

Onde:

IDv Índice de Disponibilidade Verificado;
ID Índice de Disponibilidade de Referência;
IP Indisponibilidade Programada;
$TEIP$ Taxa Equivalente de Indisponibilidade Programada;
$TEIF$ Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada;
FID Fator de disponibilidade geração, valor adimensional, limitado superiormente a um.

Portanto, caso o FID seja menor que 1, a usina avaliada terá sua garantia física reduzida (aplicação do Mecanismo de Redução da Energia Assegurada – MRA), que irá impactar diretamente na análise do MRE, dessa forma, o agente em questão necessitará comprar uma maior quantidade de energia de outros geradores para atender seus requisitos contratuais de energia assegurada, ocorrendo perdas de receita significativas, motivo pelo qual propiciou esse estudo de caso.

2.2 A Manutenção Preventiva e sua Importância

A manutenção engloba atividades que realizam a correção, prevenção ou predição de falhas, representando um papel estratégico nas organizações, deixando de ser apenas eficiente e se tornando eficaz, com outras palavras, não significa reparar ou consertar o equipamento rapidamente e sim manter a disponibilidade do equipamento o maior tempo possível e diminuir a probabilidade de parada (Kardec and Nascif, 2009).

A manutenção preventiva tem como papel, evitar a ocorrência de qualquer tipo de falha, evitando ao máximo as quebras, esse tipo de manutenção é imprescindível, pois garante o funcionamento dos equipamentos, a confiabilidade e sua segurança (Viana, 2002). O contrário acontece na manutenção corretiva, que de acordo com Kardec and Nascif (2009), consiste em deixar as instalações operando, realizando-a somente após a quebra do equipamento ter ocorrido, porém esse tipo de manutenção resulta normalmente em altos custos, parada de máquina por tempo elevado e, sobretudo, a baixa disponibilidade de produção. Além disso, os custos da função manutenção vão além do custo operacional relacionado ao reparo, no contexto abordado neste estudo, ocorre ainda o custo ocasionado devido a indisponibilidade do equipamento em função das manutenções ocorridas, detalhado mais a frente neste artigo.

Atualmente, a SAE prioriza as manutenções baseadas em alguns fatores como: risco de sinistros, com longo tempo para recuperação, tempo de operação do equipamento entre as manutenções preventivas realizadas a cada 25.000 horas de operação, e sistemas que necessitam intervenções para não falhar durante o período úmido, como exemplo, os sistemas auxiliares e sistemas de vedação do eixo. Entretanto, essa priorização pode ser feita através de metodologias sofisticadas, levando em consideração diversos índices relevantes para usina.

2.3 O Método AHP

O processo de tomada de decisão está presente a todo momento no dia a dia dos gestores e um dos métodos mais comuns utilizados é o método de Análise Hierárquica do Processo ou, em inglês, *Analytic Hierarchy Process* (AHP), introduzido por Saaty (1988). Este modelo é consagrado na literatura, auxiliando na tomada de decisão que combina análise quantitativa de múltiplos critérios frente a alternativas existentes.

O método AHP é estruturado através de uma hierarquia, composta no topo pelo seu objetivo, na sequência um conjunto de critérios interligados ao conjunto de alternativas, selecionados para auxiliar gestores a tomar decisões (Saaty, 1988). Saaty and Vargas (2012) complementam que talvez a tarefa mais importante é definir quais os fatores serão utilizados na hierarquia, pois eles devem ser relevantes o

suficiente para representar o problema da forma mais real possível. Portando, o objetivo do processo hierárquico é encontrar a alternativa de preferência ou uma sequência de alternativas, através de um *ranking* que fornecerá uma visão geral de relacionamentos complexos, capturando aspectos subjetivos e objetivos.

Na literatura, o AHP é utilizado em diversas aplicações para auxílio à tomada de decisão, como no artigo desenvolvido por Keeley and Matsumoto (2018), em que os autores apresentam a metodologia do AHP para esclarecer a importância relativa nas decisões de localização de investidores estrangeiros em energia eólica e solar. O método pode ser utilizado também para auxiliar no gerenciamento de inventário de peças de reposição de aeronaves, a fim de manter a disponibilidade operacional da aeronave e reduzir o tempo de inatividade desnecessário (Ayu Nariswari et al., 2019). No campo da gestão da manutenção, Azadeh et al. (2017) propõem em sua pesquisa, avaliar a engenharia de resiliência (ER) nos 11 departamentos de manutenções regionais utilizando o método AHP. Trabalhos como os de Keeley and Matsumoto (2018), Ayu Nariswari et al. (2019), Azadeh et al. (2017) e o outros encontrados na revisão da literatura de Darko et al. (2019) sobre o uso AHP na construção civil, motivam o engajamento na utilização da ferramenta de apoio à tomada de decisão entre multicritérios, o método AHP.

Etapas do Método AHP: O processo será descrito em etapas a seguir, adaptadas de Saaty (1988) para o contexto:

Etapa 1 – Estruturar hierarquia: é formada por três níveis, o objetivo da decisão no nível superior, seguido de um segundo nível, composto pelos critérios e um terceiro nível com as alternativas que serão avaliadas.

Etapa 2 – Construir matriz de critérios: nessa etapa são atribuídos os pesos aos critérios representando a intensidade da relação entre si. Esses pesos seguem a escala desenvolvida por Saaty (1988), representada na Tabela 1. É uma matriz de critérios *versus* critérios, onde a diagonal principal é preenchida com o valor 1, pois é a relação do critério com ele mesmo e lembrando que, preenchendo a relação de um critério 'A' com 'B', a relação de 'B' com 'A' deverá ser o inverso.

Etapa 3 – Normalizar a matriz de critérios e encontrar o vetor de prioridade: após a matriz de critérios desenvolvida, deve-se normalizá-la, dividindo o valor de cada elemento pela soma da coluna a qual está situado, formando uma nova matriz. Na sequência, calcula-se a média de cada linha, encontrando assim o **autovetor** que contém o peso ou prioridade de cada critério.

Etapa 4 – Encontrar o desvio máximo da matriz de critérios, conhecido como λ_{max}: primeiro encontra-se o vetor **autovalor**, que é formado através do produto da matriz de critérios com o **autovetor**. Em seguida, encontramos o vetor estimativa de λ, formado através da divisão do **autovalor** pelo **autovetor**, o λ_{max} será o valor médio do vetor estimativa de λ.

Etapa 5 – Identificar o Índice de Consistência (IC) da matriz de critérios: é encontrado através da Equação 6, onde n representa a quantidade de critérios analisados e o λ_{max} calculado conforme a **Etapa 4**.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{6}$$

Etapa 6 – Verificar consistência da matriz de critérios: a avaliação dos especialistas pode conter inconsistências nos seus julgamentos, mas o ideal é que sejam as menores possíveis, para isso é calculada a Razão de Consistência (RC) verificando se as atribuições têm coerência, sendo definida pela Equação 7. O Índice Randômico (IR) é um valor tabelado que pode ser consultado na Tabela 2 adaptada por Saaty and Vargas (2012), variando de acordo com a ordem da matriz. Além disso, Saaty and Vargas (2012) afirma que uma matriz de critérios é considerada consistente se RC $<$ 0,1.

$$RC = \frac{IC}{IR} \tag{7}$$

Etapa 7 – Construir matriz de alternativas *versus* critérios: da mesma forma que a matriz critérios, são atribuídos os pesos na matriz utilizando a escala de Saaty and Vargas (2012) ou valores históricos das alternativas frente aos critérios. Essa matriz também deve ser normalizada conforme descrito na **Etapa 3**.

Etapa 8 – Encontrar ordem de prioridades: consiste em realizar o produto da matriz de alternativas normalizada *versus* critérios encontrada na **Etapa 7** pelo autovetor, ou seja, pelo peso de cada critério encontrado na **Etapa 3** e assim, obtém-se o vetor prioridade.

3. O ESTUDO DE CASO

O estudo de caso terá como cenário a Usina Hidrelétrica Santo Antônio Energia, visto que vem apresentando um deficit significativo em sua receita devido a aplicação do FID. Como já mencionado nas seções anteriores, o FID é calculado levando em consideração as taxas de manutenções programada e forçadas, portanto, o objetivo deste trabalho é propor uma alternativa que possa melhorar o desempenho do FID, com foco nas manutenções.

Sobre a Usina Hidrelétrica Santo Antônio Energia, ela teve o início das operações em 30 de março de 2012, está localizada no Rio Madeira, com sede no município de Porto Velho em Rondônia e tem potência instalada de 3.568 MW e 2.424 MW médios de energia assegurada, sendo composta por 50 turbinas do tipo Bulbo (SAE, 2020).

O objetivo da aplicação demonstrada na seção seguinte é obter um *ranking* das UGs, buscando identificar aquelas que estão com o pior desempenho, utilizando diversos indicadores da manutenção. Proporcionando então, a priorização de turbinas mais críticas para a realização da manutenção preventiva, pois quando bem administrada, poderá aumentar a confiabilidade, a segurança e principalmente a disponibilidade dos equipamentos, além de eliminar ou reduzir as probabilidades de paradas forçadas para manutenções corretivas, fatores impactantes no FID.

Para atender o objetivo proposto, será utilizado o método que auxilia à decisão sob múltiplos critérios, o Método

Tabela 1. Escala de Saaty (Saaty and Vargas, 2012).

Intensidade Importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra e a sua dominância é demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A evidência favorecendo uma atividade em relação à outra é do mais alto grau de certeza
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando é necessário uma condição de compromisso
Recíprocos dos números acima	Se a atividade i tem uma intensidade de importância citada acima quando comparada com a atividade j, logo j tem tem valor recíproco quando comparado com i	

Tabela 2. Índice Randômico (IR) (Saaty and Vargas, 2012).

n	IR	n	IR
1	0	**6**	1,25
2	0	**7**	1,35
3	0,52	**8**	1,4
4	0,89	**9**	1,45
5	1,11	**10**	1,49

AHP, que terá a aplicação para a usina descrita na seção seguinte. A ferramenta irá proporcionar dois *rankings*, dividindo as 50 unidades geradoras (UGs) da SAE em dois grupos, o grupo formado pelas Turbinas de 4 pás (24 UG's) e o outro pelas Turbinas de 5 pás (26 UG's), obtendo o conjunto de alternativas em seus respectivos grupos. O conjunto de critérios serão indicadores de manutenção utilizados na SAE, considerados extremamente importantes, principalmente pelo fato de serem indicadores fiscalizados pela ANEEL que refletem o desempenho operacional da usina, impactando no FID. Os critérios utilizados são:

- **TF** - Taxa de Falhas;
- **TDF** - Taxa de Desligamento Forçado;
- **INDISPMP** - Indisponibilidade para Manutenção Programada;
- **INDISPMF** - Indisponibilidade para Manutenção Forçada;
- **TMEF** - Tempo Médio Entre Falhas;
- **TMR** - Tempo Médio de Reparo;
- **HDF + HEDF** - Soma do número de Horas de Desligamento Forçado e Horas Equivalentes de Desligamento Forçado.

Todos os índices citados acima, com exceção do TMEF, indicam que pior é o desempenho da turbina à medida que seus valores crescem. Dessa forma, com o intuito de padronizar e manter todos os índices alinhados com o objetivo do AHP, os valores do índice TMEF das UG's são utilizados invertidos para aplicação da metodologia.

Cabe salientar que a SAE possui apenas dois tipos de turbinas, de 4 pás e de 5 pás, as quais possuem características particulares, portanto, as análises foram realizadas separando-as nestes dois grupos. Por exemplo, as turbinas do grupo de 4 pás ficam paradas cerca de 3 meses durante o ano por restrição de queda, dessa forma, não é conveniente fazer comparações de desempenho das turbinas entre grupos com eficiências, projetos e manutenções distintas.

3.1 Modelagem do Problema

A análise multicritério permitirá que se avalie quais as melhores alternativas entre as UGs a serem trabalhadas de acordo com objetivo desejado, pois ao contrário da decisão simples que analisa somente um critério para a classificação das alternativas, a análise multicritério apresenta uma classificação das alternativas que são melhores de uma forma global.

A ferramenta irá proporcionar uma classificação dos 2 grupos das UGs da SAE e o principal reflexo será que após as manutenções preventivas realizadas nas turbinas consideradas piores, irá proporcionar um melhor desempenho e confiabilidade das mesmas, principalmente nos períodos em que a usina precisa de todas disponíveis simultaneamente para atender ao despacho do ONS.

A Hierarquia formada no estudo de caso encontra-se representada nas Figuras 1 e 2, apresentando o Grupo de 4 pás e de 5 pás respectivamente. Por conveniência, a hierarquia foi desenhada na horizontal.

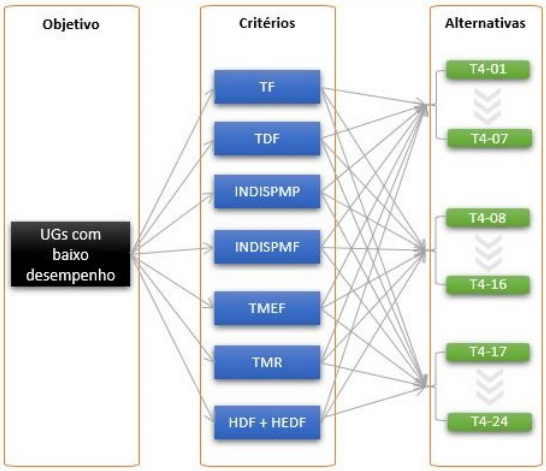

Figura 1. Hierarquia - Grupo de 4 pás.

A matriz de critérios desenvolvida para o estudo de caso da Santo Antônio Energia está representada na Tabela 3. Os

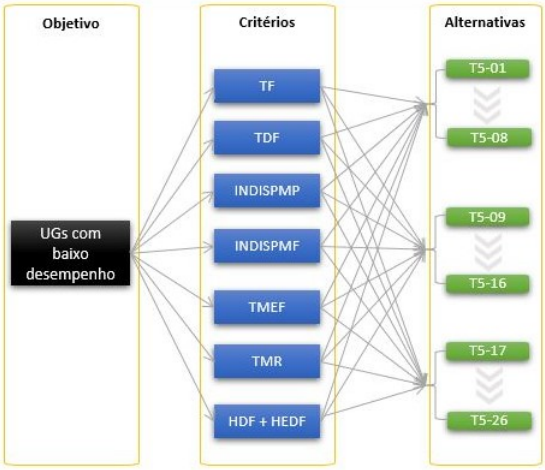

Figura 2. Hierarquia - Grupo de 5 pás.

pesos considerados nesta avaliação levam em consideração o conhecimento e experiência dos autores, sendo atribuído por eles cada peso.

Após feita a normalização da matriz de critérios, descrito na **Etapa 3**, encontra-se o **autovetor**, visualizado na Tabela 4, que contém o percentual de prioridade de cada critério.

Antes de dar continuidade ao processo, é necessário avaliar o nível de consistência da matriz de critérios. Para isso é preciso encontrar o desvio máximo da matriz, chamado de λ_{max}, o qual são necessários os valores do **autovetor** e o vetor estimativa de λ, que tem seus cálculos descritos na **Etapa 4**. Todos os valores estão demonstrados na Tabela 5.

O Índice de Consistência (IC) e a Razão de Consistência (RC) podem então ser calculados e estão representados nas Equações 8 e 9, respectivamente. Considerando que foi utilizado 7 critérios e consultado o Índice Randômico (IR) na Tabela 2, têm-se $n = 7$ e $IR = 1,35$. Com RC encontrada no valor de 1,07% a matriz de critérios é considerada consistente.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{7,085 - 7}{7 - 1} = 0,014 \tag{8}$$

$$RC = \frac{IC}{IR} = \frac{0,014}{1,35} = 0,017 = 1,07\% \tag{9}$$

Com relação a matriz das alternativas, como mencionado, a análise foi dividida em dois grupos, o Grupo de 4 pás e o de 5 pás, portando, foram obtidas 2 duas matrizes, as quais são aplicadas o AHP separadamente. Para cada UG, foi utilizado a média histórica de cada indicador da matriz de critérios para construção das matrizes de alternativas.

Por fim, seguindo orientações da **Etapa 8**, encontra-se a ordem de prioridades de cada grupo, demonstrando a classificação das unidades geradoras e seus respectivos percentuais de prioridade, como pode ser visto na Tabela 6.

3.2 Análise dos Resultados

A análise utilizando o Método de Multicritério AHP fornece uma classificação das turbinas com baixo desempenho de forma mais refinada e sofisticada, ao contrário da análise simples, que analisa apenas um critério.

Portando, os resultados obtidos apresentados na Tabela 6 apresentam resultados bem interessantes. Dentro do Grupo de UG's de 4 pás, as turbinas 04; 09; 15; 18; 08; 23; 05 e 16 estão no topo apresentando o pior desempenho nesta sequência, representado juntas, mais de 50% na ordem de prioridade, com destaque para a T4-04, liderando a prioridade no seu grupo. Já no Grupo de UG's de 5 pás as unidades 24 e 08 possuem grande importância, através do método AHP encontra-se que elas representam 1/3 da prioridade do seu respectivo grupo, o que reforça a necessidade de direcionar manutenções preventivas para essas UG's.

Pode ser observado através da Figura 3, que se o gestor avalia apenas um critério, por exemplo, considerando o Grupo de 4 pás, analisando a média de HDF + HEDF, a primeira alternativa escolhida para priorizar a manutenção seria a T4-23, entretanto, no método AHP, essa alternativa encontra-se na 6ª posição. A mesma divergência ocorre para outros índices, se escolhido o critério TF, a primeira opção seria a T4-18, pelo índice INDISPMP, seria a T4-08, da mesma forma a decisão para os demais critérios, se avaliados individualmente, podem gerar uma decisão que não atenda de uma forma global a todas as necessidades do decisor.

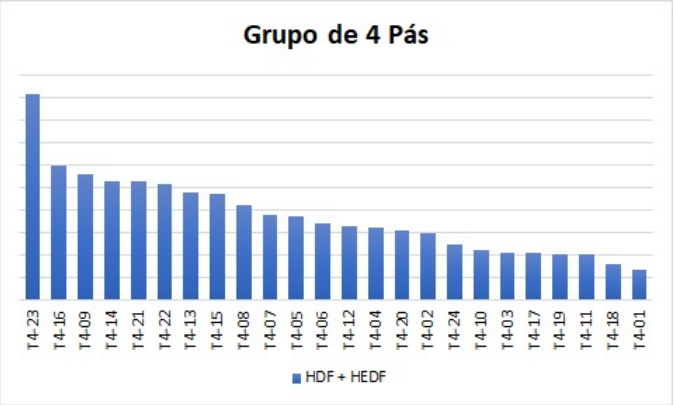

Figura 3. HDF + HEDF - Grupo de 4 pás.

Com relação a classificação encontrada no Grupo de 5 pás, comparando o método AHP com o critério HDF + HEDF, as duas primeiras posições apresentam semelhança nas duas análises, reforçando a priorização da manutenção preventiva das dessa turbinas, T5-24 e T5-08, e após elas orienta-se seguir a sequência encontrada no *ranking* do AHP. No entanto, comparando também com a análise individual de outros critérios, algumas divergências são notadas, a T5-24 por exemplo, na primeira colocação do método AHP, se analisado apenas o critério TF, demonstrado na Figura 4, encontraria-se na 16ª posição e se fosse o critério TDF, estaria na 19ª posição de priorização.

Em vista disso, a análise de apenas um índice pode levar à uma decisão equivocada, dessa forma, para considerar

Tabela 3. Matriz Critérios SAE.

	TF	TDF	INDISPMP	INDISPMF	TMEF	TMR	HDF + HEDF
TF	1	1	1/2	1/3	2	4	1/5
TDF	1	1	1/2	1/3	2	4	1/5
INDISPMP	2	2	1	1/2	3	4	1/3
INDISPMF	3	3	2	1	5	7	1/2
TMEF	1/2	1/2	1/3	1/5	1	2	1/7
TMR	1/4	1/4	1/5	1/7	1/2	1	1/9
HDF + HEDF	5	5	3	2	7	9	1
TOTAL	12,75	12,75	7,53	4,51	20,50	32,00	2,49

Tabela 4. Peso de cada Critério SAE - Autovetor.

Índice	Autovetor	Prioridade (%)
TF	0,086	8,6%
TDF	0,086	8,6%
INDISPMP	0,142	14,2%
INDISPMF	0,232	23,2%
TMEF	0,048	4,8%
TMR	0,027	2,7%
HDF + HEDF	0,379	37,9%

Tabela 5. Autovalores e λ_{max}.

Autovalor	Estimativa de λ
0,604	7,044
0,604	7,044
1,011	7,214
1,656	7,149
0,337	7,041
0,198	7,027
2,714	7,167
λ_{max}	**7,085**

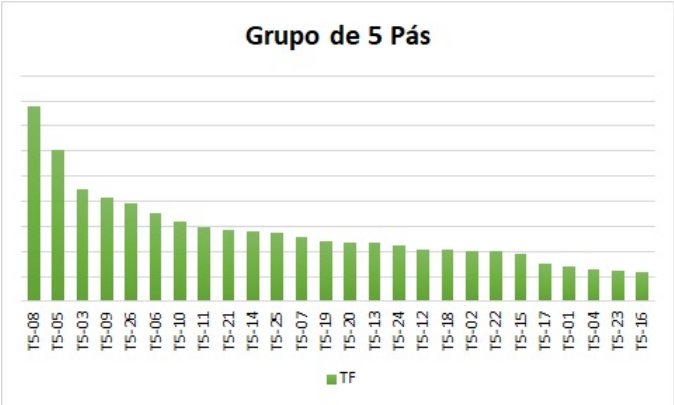

Figura 4. TF - Grupo de 5 pás.

todos os parâmetros disponíveis de forma global, a aplicação do método AHP se mostra extremamente necessária, resultando em uma classificação mais realista das UGs, auxiliando de forma mais eficiente a usina na prioridade da realização de manutenções programadas.

É importante ressaltar que as premissas do modelo matemático podem e devem ser alteradas de acordo com as necessidades do gestor e/ou sempre que houver necessidade de reavaliação das prioridades das turbinas, podendo principalmente utilizar outros indicadores de posse, como por exemplo, indicadores de custo e ainda alterar os pesos de cada critério para um melhor retrato da realidade da usina, seguindo como sugestão para trabalhos futuros.

Tabela 6. Matriz Prioridade SAE - Grupo de 4 e 5 pás.

Grupo de 4 pás		Grupo de 5 pás	
UG	**Prioridade**	**UG**	**Prioridade**
T4-04	11,89%	**T5-24**	19,69%
T4-09	8,2%	**T5-08**	14,07%
T4-15	7,8%	**T5-26**	9,09%
T4-18	6,3%	**T5-07**	5,59%
T4-08	5,6%	**T5-09**	4,13%
T4-23	5,25%	**T5-18**	3,84%
T4-05	4,68%	**T5-03**	3,68%
T4-16	4,02%	**T5-06**	3,48%
T4-21	3,95%	**T5-10**	3,34%
T4-24	3,84%	**T5-05**	3,3%
T4-22	3,65%	**T5-25**	3,01%
T4-20	3,48%	**T5-23**	3%
T4-01	3,29%	**T5-12**	2,54%
T4-10	3,27%	**T5-01**	2,36%
T4-14	3,23%	**T5-20**	2,29%
T4-13	3,11%	**T5-11**	2,16%
T4-03	2,79%	**T5-04**	1,98%
T4-07	2,75%	**T5-16**	1,73%
T4-17	2,53%	**T5-13**	1,6%
T4-06	2,48%	**T5-21**	1,6%
T4-12	2,4%	**T5-14**	1,53%
T4-02	2,2%	**T5-02**	1,44%
T4-19	2,01%	**T5-22**	1,38%
T4-11	1,29%	**T5-15**	1,3%
		T5-19	1,03%
		T5-17	0,85%

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho o método de apoio a decisão multicritério AHP foi aplicado com objetivo de classificar as turbinas da usina hidrelétrica de Santo Antônio, de forma à auxiliar na decisão do planejamento das manutenções programadas, priorizando as piores UGs indicadas pelo AHP.

Para aplicação do método, as alternativas são as UG's, separadas em seus grupos de acordo com o número de pás. Já os critérios são as médias históricas dos índices de indisponibilidade e manutenção de cada unidade, os quais impactam diretamente e indiretamente no cálculo do FID, representando em grandes perdas financeiras para as usinas, de acordo com a Resolução Normativa n° 614/2014.

Dessa forma, a aplicação do AHP permite obter uma classificação global das turbinas presentes na usina, levando em consideração os diversos índices relevantes das máquinas e

seus respectivos pesos. Sendo assim foi possível encontrar a ordem prioridade para as UG's de 4 e 5 pás, determinando um *ranking* informando as turbinas com desempenhos piores e melhores.

Por fim, a principal contribuição do trabalho é a obtenção da classificação das turbinas utilizando dados reais da Usina de Santo Antônio, a qual é de grande importância para o agente, já que fornece significativo auxílio para quais unidades devem ser priorizados para receber uma manutenção preventiva, com objetivo de evitar paradas forçadas, que impactam diretamente no FID, levando a grandes prejuízos financeiros.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo agradecem ao apoio do CNPq, FAPEMIG, INERGE, CAPES (Código de Financiamento 001), e a empresa Santo Antônio Energia SA através do P&D ANEEL N^o CT.PD.318.2019.

REFERÊNCIAS

ANEEL (2003). Resolução normativa n° 688/2003, de 24 de dezembro de 2003. Disponível em: `http://www2.aneel.gov.br/cedoc/res2003688.pdf`.

ANEEL (2014). Resolução normativa n° 614/2014, de 3 de junho de 2014. Disponível em: `http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2014614.pdf`.

Arantes, A.C. (2010). Mecanismo de redução de energia assegurada e o seu impacto no planejamento e organização da engenharia de manutenção da geração.

Ayu Nariswari, N.P., Bamford, D., and Dehe, B. (2019). Testing an ahp model for aircraft spare parts. *Production Planning & Control*, 30(4), 329–344.

Azadeh, A., Asadzadeh, S.M., and Tanhaeean, M. (2017). A consensus-based ahp for improved assessment of resilience engineering in maintenance organizations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 47, 151–160.

Brito, M.C.T. (2016). Análise da repactuação do risco hidrológico das usinas hidrelétricas participantes do mecanismo de realocação de energia. *UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro.*

da Cunha, P.C.F. (2015). *Porque o GSF virou pesadelo?* Fundação Getúlio Vargas Energia. Disponível em: `http://www.fgv.br/fgvenergia/paulo_gsf/files/assets/common/downloads/Paulo_GSF.pdf`.

Darko, A., Chan, A.P.C., Ameyaw, E.E., Owusu, E.K., Pärn, E., and Edwards, D.J. (2019). Review of application of analytic hierarchy process (ahp) in construction. *International journal of construction management*, 19(5), 436–452.

EPE (2020). Plano decenal de expansão de energia. Disponível em: `https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-422/PDE\%202029.pdf`.

Fernandes, G., Brandão, L., Gomes, L., and Vasconcelos, G. (2016). A proposal of reformulation of hydropower sales contracts in the brazilian electricity sector. In *Energy: Expectations and Uncertainty, 39th IAEE International Conference, Jun 19-22, 2016*. International Association for Energy Economics.

Kardec, A. and Nascif, J. (2009). *Manutenção-função estratégica*. Qualitymark Editora Ltda.

Keeley, A.R. and Matsumoto, K. (2018). Relative significance of determinants of foreign direct investment in wind and solar energy in developing countries–ahp analysis. *Energy policy*, 123, 337–348.

Melo, J.L., Alves, A.C.B., Brigatto, G.A., and Negrete, L.P. (2016). Mercado de energia elétrica: Volatilidade do preço spot e risco da geração hidrelétrica com despacho centralizado. *VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*.

Nascimento, L. (2020). Santo antônio energia questiona cobrança de r$ 812 milhões. `https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2018-04/santo-antonio-energia-questiona-cobranca-\\de-r-812-milhoes`. Accesso em 08/06/2020.

Saaty, T.L. (1988). What is the analytic hierarchy process? In *Mathematical models for decision support*, 109–121. Springer.

Saaty, T.L. and Vargas, L.G. (2012). *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process*, volume 175. Springer Science & Business Media.

SAE (2020). Site oficial da hidrelétrica santo antônio energia. http://www.santoantonioenergia.com.br. Acessado em maio de 2020.

Souza, L.B. (2019). Judicialização no setor elétrico: desafios de gestão de projetos de geração hidrelétrica – estudo de caso da uhe santo antônio.

Viana, H.R.G. (2002). *PCM-Planejamento e Controle da manutenção*. Qualitymark Editora Ltda.