

MARCOS PAULO FERNANDES GRANATO

**Análise multicritério da turbina hidráulica ideal para
usinas hidroelétricas de baixa queda**

Marcos Paulo Fernandes Granato

**Análise multicritério da turbina hidráulica ideal para
usinas hidroelétricas de baixa queda**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Valério Antônio P. Salomon

G748a Granato, Marcos Paulo Fernandes
Análise multicritério da turbina hidráulica ideal para usinas hidroelétricas de baixa queda / Marcos Paulo Fernandes Granato – Guaratinguetá, 2020.
46 f : il.
Bibliografia: f. 44-46

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020. Orientador: Prof. Dr. Valério Antonio Pamplona Salomon

1. Turbinas hidráulicas. 2. Usinas hidrelétricas. 3. Processo decisório por critério múltiplo. I. Título.

CDU 621.224

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

MARCOS PAULO FERNANDES GRANATO

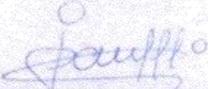
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUANDO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

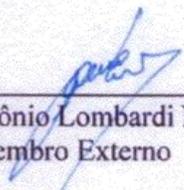
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Valério Antônio Pamplona Salomon
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. José Alexandre Matelli
UNESP-FEG


Prof. Antônio Lombardi Netto
Membro Externo

Dezembro, 2019

DADOS CURRICULARES

MARCOS PAULO FERNANDES GRANATO

NASCIMENTO 10.01.1996 – São José dos Campos / SP

FILIAÇÃO José Aparecido Granato
Jacidalva Fernandes Gonçalves Granato

dedico este trabalho
de modo especial, à minha família.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha saúde, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Valério Antônio Salomon* que me incentivou a vencer desafios. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível,

aos meus pais *Dalva e Granato*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos e estiveram ao meu lado,

à minha irmã *Bruna Granato* por estar sempre orando por mim e me ajudando mesmo à distância

aos meus queridos amigos Matheus Campos, André Falsarella, Pedro Amâncio, Isabelle Idalgo e Taiane de Oliveira que durante todos os anos de estudo estiveram do meu lado me apoiando e muitas vezes cuidando de mim.

a todos os amigos da faculdade e do serviço que estiveram junto comigo em todos os momentos.

a todos os professores que contribuíram para a minha formação por todo conhecimento adquirido. Sem vocês eu não teria chegado até ao fim,

aos amigos do meu primeiro estágio Daniel Orico, Vinicius Scarpa e Adilson Costilhas por toda ajuda e prontidão em me auxiliar neste trabalho.

aos funcionários da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Onde as necessidades do mundo e os seus talentos se cruzam, aí está sua vocação”.

Aristóteles

RESUMO

O processo de seleção de turbinas hidráulicas é parte crítica em usinas hidrelétricas de baixa queda, pois existem muitas opções aplicáveis e uma escolha equivocada pode inviabilizar todo o projeto devido ao baixo retorno energético e financeiro. No cenário brasileiro, é possível observar que existe um interesse comercial e acadêmico, que visa definir uma metodologia capaz de alinhar as características de uma futura usina hidrelétrica a fim de determinar a turbina ideal para o projeto. Logo, com o intuito de atender estes objetivos, fora aplicado um estudo a respeito de usinas hidrelétricas para descrever a problemática com os devidos critérios e enfim propor uma análise multicritério, conhecida como AHP, visando indicar a turbina ideal. Para tal foram avaliadas 3 opções de turbinas para a usina modelo de Santo Antônio de Jari. Uma das alternativas proposta na análise é a própria turbina que de fato está aplicada na hidrelétrica de Jari para método de comparação. Desta forma, após todos os cálculos, foi possível aferir que o método AHP é capaz de complementar as equações fluidodinâmicas a fim de indicar a turbina ideal para o caso estudado, pois a resposta sugerida pelo AHP foi justamente a turbina em funcionamento na usina de Jari, embora não fosse uma escolha trivial. Portanto, vê-se que estas análises trabalhadas vão de encontro com as necessidades do mercado atual e servem como um bom embasamento para a inserção desta metodologia ao processo atual de determinação da turbina hidráulica ideal.

PALAVRAS-CHAVE: Turbinas hidráulicas. AHP. Baixa queda. Análise multicritério. Usinas hidrelétricas

ABSTRACT

The process of selecting hydraulic turbines is a critical part of low drop hydropower plants as there are many applicable options and a wrong choice can make the whole project unfeasible due to the low energy and financial return. In the Brazilian scenario, it is possible to observe that there is a commercial and academic interest, which aims to define a methodology capable of aligning the characteristics of a future hydroelectric plant in order to determine the ideal turbine for each project. Therefore, in order to achieve these objectives, a study on hydroelectric plants was applied to describe the problem with the proper criteria and then propose a multicriteria analysis, known as AHP, aiming to indicate the ideal turbine. For this case, 3 turbine options were evaluated for the Santo Antônio de Jari model plant. One of the alternatives proposed in the analysis is the turbine that is actually applied in the Jari dam for comparison method. Thus, after all calculations, it was possible to verify that the AHP method is able to complement the fluid dynamics in order to indicate the ideal turbine for the case studied, because the answer suggested by the AHP method was precisely the turbine in operation at the Jari plant, although it was not a trivial choice. Therefore, it is clear that these worked analyzes meet the needs of the current market and serve as a good basis for the insertion of this methodology to the current process of determination of the ideal hydraulic turbine.

KEYWORDS: Hydraulic turbines. AHP. Low drop. Multicriteria analysis. Hydroelectric plants

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Campos de Aplicação de Turbinas Hidráulicas.....	14
Figura 2 – Divisão percentual da potência a ser instalada no parque gerador brasileiro (dividido por tipo de usina)	15
Figura 3 – Perfil esquemático de uma usina hidrelétrica	17
Figura 4 – Componentes comuns entre as turbinas (a) Pelton, (b) Francis, (c) Kaplan	20
Figura 5 – Modelo 3D de uma Turbina Francis	21
Figura 6 – Modelo 3D de uma turbina Kaplan	22
Figura 7 – Modelo 3D de uma turbina Bulbo	23
Figura 8 – Modelo 3D de uma turbina Pelton	24
Figura 9 – Representação 3D turbina acoplada ao gerador	26
Figura 10 – Esquema hierárquico genérico	28
Figura 11 – Escala Fundamental	29
Figura 12 – Representação genérica de uma matriz de comparações	30
Figura 13 – Índice Aleatório (RI)	32
Figura 14 – Custos de Turbinas Kaplan	34
Figura 15 – Custos de Turbinas Bulbo	35
Figura 16 – Custo total das obras civis da casa de força	35
Figura 17 – Hierarquia para seleção da turbina hidráulica ideal	37
Figura 18 – Valores dos critérios atrelados a cada opção	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz de comparação do critério potência nominal	38
Tabela 2 – Verificação de inconsistência do critério potência nominal	39
Tabela 3 – Matriz de comparação do critério preço das máquinas	39
Tabela 4 – Verificação de inconsistência do critério preço das máquinas	39
Tabela 5 – Matriz de comparação do critério custo da casa de força – obra civil	39
Tabela 6 – Verificação de inconsistência do critério custo da casa de força – obra civil	40
Tabela 7 – Matriz de comparação do critério prazo	40
Tabela 8 – Verificação de inconsistência do critério prazo	40
Tabela 9 – Matriz de comparação entre os critérios	40
Tabela 10 – Verificação de inconsistência oriundo da comparação entre os critérios	41
Tabela 11 – Matriz de comparação entre as alternativas e critérios	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Três Dimensões
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
MCDA	Multiple Criteria Decision Analysis
MCDM	Multiple Criteria Decision Making
MME	Ministério de Minas e Energia
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
UHE	Usina Hidrelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

AI	autovetor idealizado
CI	índice de consistência
CR	razão de consistência
g	constante gravitacional
H	altura de queda líquida
N	dimensão
P	potência
RI	índice aleatório
S	autovetor normalizado
Q	vazão volumétrica
η	eficiência
ρ	massa específica
ω	velocidade angular
λ_{\max}	autovalor máximo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	14
1.2	MOTIVAÇÃO	15
1.3	OBJETIVOS	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	USINA HIDROELÉTRICA	17
2.2	TURBINAS HIDRÁULICAS.....	18
2.2.1	Turbina Francis	20
2.2.2	Turbina Kaplan	21
2.2.3	Turbina Bulbo	22
2.2.4	Turbina Pelton	23
2.3	GERADOR	24
2.4	ANÁLISE MULTICRITÉRIO.....	26
2.4.1	Analytic Hierarchy Process - AHP	27
2.4.2	Síntese Ideal	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	METODOLOGIA.....	33
3.2	MODELAGEM PARA A DETERMINAÇÃO DE CUSTOS	33
4	RESULTADO E DISCUSSÕES	37
5	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

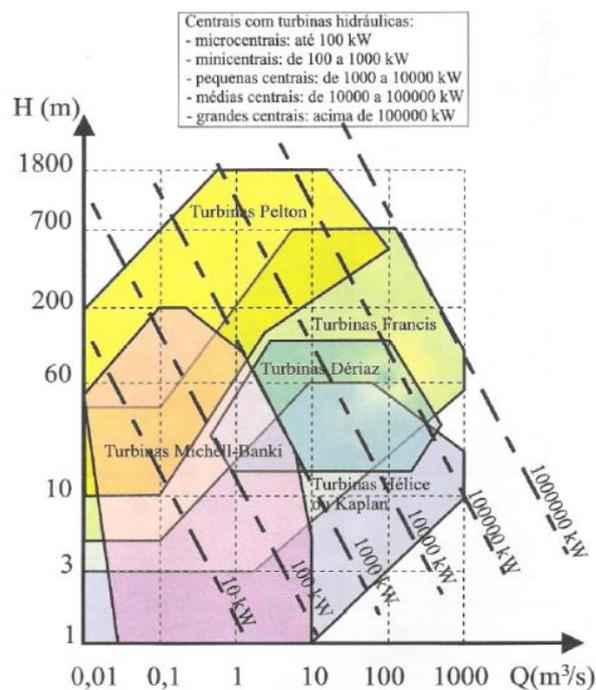
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O processo de seleção de turbina hidráulica é uma das partes fundamentais em um projeto de Usina Hidroelétrica. Saber aproveitar os aspectos físicos do local e do ambiente pode ser preponderante tanto do ponto de vista de geração de energia, quanto do aspecto financeiro, uma vez que, em se tratando de baixa queda, a questão financeira pode não ser tão atrativa, logo uma seleção de máquina incorreta pode inviabilizar todo o projeto (RODRIGUES, 2014).

Atualmente, levando em consideração todos os tipos de turbinas e suas variações, existem uma enorme variedade de turbinas com diferentes características para aplicação, contudo as metodologias fluido-mecânicas existentes de se selecionar uma turbina hidrogeradora não é 100% precisa, isto é, em alguns desses estudos de caso mais de um tipo de turbina é aplicável para a mesma circunstância.

A Figura 1 apresenta os campos de aplicação de turbinas hidráulicas, que leva em consideração a altura de queda, a vazão e a potência. Pode-se verificar, na figura, que existem regiões de sobreposição, onde mais de um tipo de turbina é aplicável.

Figura 1 - Campos de Aplicação de Turbinas Hidráulicas



Fonte: Henn (2006).

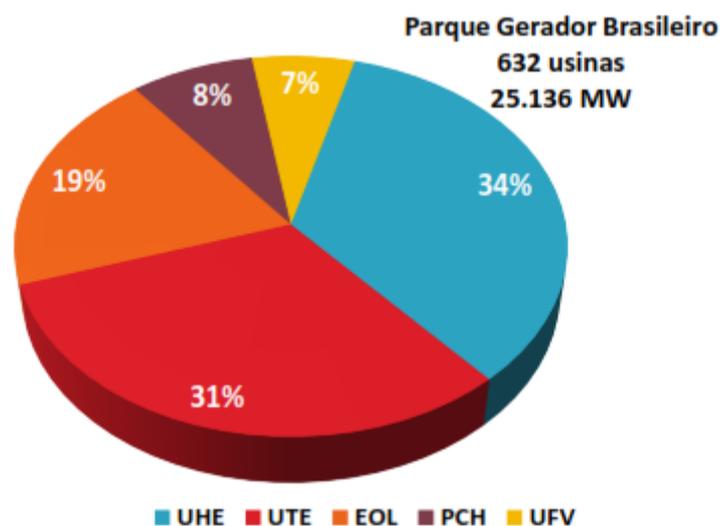
Portanto, o intuito deste trabalho é apresentar metodologias de seleção de turbina e propor um complemento à tomada de decisão, baseando-se em uma análise multicritério, visando, por fim, selecionar a turbina ideal para o respectivo caso em questão.

1.2 MOTIVAÇÃO

A hidroeletricidade tem sido a principal fonte de geração do sistema elétrico brasileiro, representando cerca de 65% da capacidade instalada de seu parque gerador. Esta expressiva participação na matriz elétrica se deve ao grande potencial hidrelétrico do país e às várias vantagens que esta fonte de geração de energia elétrica apresenta com relação às demais. Trata-se de uma fonte de geração renovável, economicamente competitiva, além de apresentar grande flexibilidade operativa, capaz de responder às flutuações de demanda quase instantaneamente (EPE/MME, 2015).

A capacidade a ser instalada prevista para o Brasil é de 25.136,42 MW, divididas em 632 novas usinas, sendo 34% oriundas de fontes hídricas, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Divisão percentual da potência a ser instalada no parque gerador brasileiro (dividido por tipo de usina).



Fonte: ANEEL (2018).

Analisando tais informações, é possível observar como a fonte hídrica continuará representando a maior parcela de geração de energia elétrica, bem como seu potencial para o futuro do parque gerador brasileiro. Ao todo estão previstas 21 Usinas Hidrelétricas (UHE) com

pouco mais de 8.600 MW e outras 156 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) totalizando 2.027 MW de potência (ANEEL, 2018).

Nos últimos anos, com o aumento da competitividade no mercado energético, os profissionais do setor têm se deparado constantemente com uma questão na definição da solução técnica: qual o tipo de turbina, bem como o número de máquinas que melhor se adapta à determinado caso. Quem atua no mercado energético de fontes hídricas tem noção de que cada parte envolvida no problema conhece e domina apenas o seu produto e/ou área de atuação, sejam eles, construção civil, fabricação de equipamento, operação do sistema, entre outros, porém, a solução ideal pode englobar todas essas áreas de forma não convencional, por exemplo, não necessariamente o equipamento eletromecânico mais eficiente resultará na melhor solução final analisando tanto técnica como economicamente, uma vez que esta proposta pode resultar em uma construção civil relativamente mais cara e complexa (RODRIGUES, 2014).

É sabido, vide Figura 2, que o investimento em usinas de baixa queda (PCH), vem crescendo fortemente, e é justamente nestes casos em que se observa muitos problemas com o tipo e quantidade de turbinas, portanto fica evidente que uma tomada de decisão mais embasada se torna necessária neste caso. O intuito deste estudo é aplicar uma metodologia capaz de fornecer uma solução que analise critérios da maioria, senão todas, as áreas de um projeto de usina hidroelétrica, tendo em vista que essa troca de informações não costuma ocorrer bem, devido a diversos tipos de interesses de mercado e falhas na comunicação, logo uma vez validado o teste, o trabalho representa uma boa oportunidade de interesse, tanto acadêmico, quanto comercial.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é detalhar o funcionamento de uma usina hidrelétrica e apresentar as metodologias fluidodinâmicas que envolvem a definição da turbina hidráulica aplicável para cada projeto de usina, ou seja, o intuito deste primeiro objetivo é embasar a escolha de critérios que representem toda a problemática da seleção de turbinas.

O trabalho contemplará também objetivos específicos, como uma pesquisa ação, que visará testar o método AHP como uma forma de complementar a tomada de decisão da escolha da turbina hidráulica ideal em usinas hidrelétricas de baixa queda.

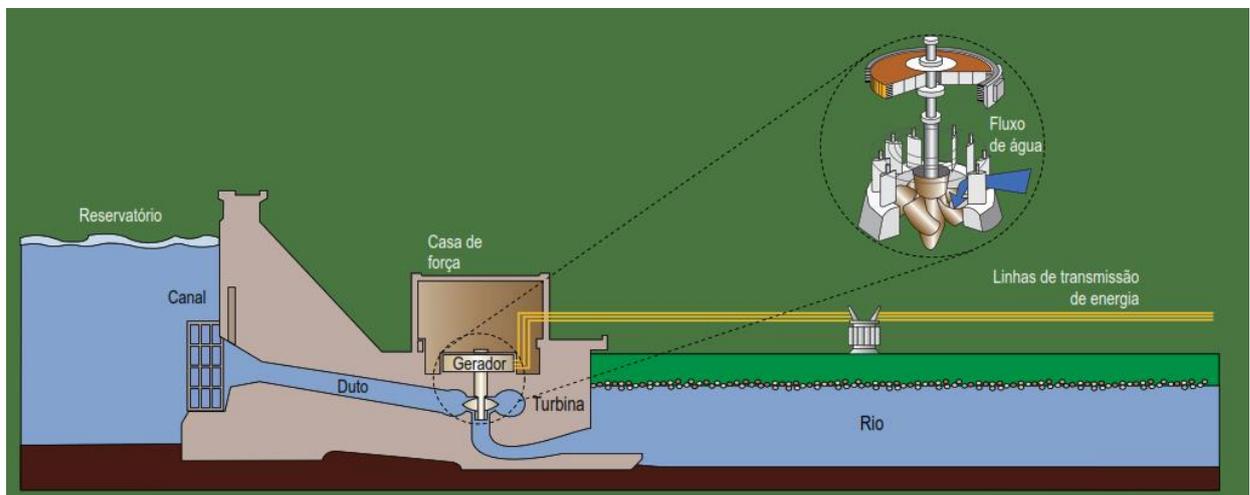
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 USINA HIDROELÉTRICA

Para se produzir energia hidrelétrica é necessário integrar a vazão do rio, a quantidade de água disponível em determinado período, os desníveis do relevo, sejam eles naturais, como as quedas d'água, ou criados artificialmente. Para isso é necessária uma estrutura complexa e diversificada que envolve desde máquinas geradoras e hidromecânicos até barragens e comportas. Vale destacar que a obra civil em uma usina hidrelétrica é a parte fundamental e mais cara de uma usina por conta de sua importância, magnitude e complexidade (SIQUEIRA, 2006).

A estrutura de uma usina é composta, basicamente, por barragem, sistema de captação e adução de água, casa de força e vertedouro, funcionando sempre em conjunto e de maneira integrada. A Figura 3 exemplifica um perfil esquemático de uma usina hidrelétrica.

Figura 3 - Perfil esquemático de uma usina hidrelétrica



Fonte: ANEEL (2018).

A barragem de uma usina hidrelétrica, ao interromper o curso normal do rio, pode ter como função a formação de um reservatório que criará um desnível a ser aproveitado em forma de energia hidráulica, ou pode assumir a função de estocar energia potencial para balancear a sazonalidade da produção de energia elétrica, ou seja, existem usinas chamadas de fio d'água, isto é, utilizam turbinas próximas a superfície do rio, com o intuito de aproveitar a velocidade deste para gerar energia, portanto para estes casos não ocorre a formação de reservatórios.

Os sistemas de captação e adução são formados por condutos, canais ou túneis metálicos, que têm a função de levar a água até a casa de força, logo, é nesta instalação que se encontram as turbinas, formadas por uma série de pás ligadas a um eixo conectado ao gerador, que durante o seu movimento giratório, transformam a energia cinética, oriunda do movimento da água, em energia elétrica. Após passar pela turbina, a água retorna ao leito natural do rio, através de um canal de fuga. Os principais tipos de turbinas, bem como suas particularidades estão explicadas de forma mais detalhada a partir da seção 2.2.

Finalizando a estrutura, tem-se o vertedouro. Sua função é permitir a saída da água sempre que os níveis do reservatório ultrapassarem os limites recomendados, ou seja, o excesso de chuva ou até mesmo de vazão, poderiam causar enchentes na região de entorno da usina, logo o processo de abertura do vertedouro visa evitar problemas como este (ANEEL, 2008).

2.2 TURBINAS HIDRÁULICAS

A turbina hidráulica é certamente o equipamento mecânico mais importante de uma usina hidrelétrica, sendo um dos componentes fundamentais para a transformação da energia da água. Basicamente as turbinas podem ser do tipo ação ou reação, isto é, as turbinas do tipo ação convertem toda a energia potencial hidráulica da queda d'água em energia cinética, para enfim incidir nas pás do rotor e ser convertida em energia mecânica rotacional, enquanto as do tipo reação são aquelas que convertem a energia mecânico-hidráulica, das formas cinética e de pressão, em energia mecânica motriz. A energia mecânica resultante da transformação da turbina transfere torque e velocidade de rotação para um gerador elétrico através de um eixo acoplado entre as partes (SIQUEIRA, 2015).

A potência P , em Watts, que uma turbina pode extrair do fluxo de água é proporcional ao produto da vazão volumétrica Q , em m^3/s , e da altura de queda d'água disponível H , em mca, conforme explícito na Equação 1.

$$P = \rho * g * H * Q * \eta \quad [W] \quad (1)$$

No qual:

ρ é a massa específica da água, em kg/m^3

g é a aceleração da gravidade, em m/s^2

H é a queda líquida, em mca

Q é a vazão volumétrica, em m^3/s

η é a eficiência da turbina, a fração (entre 0 e 1) da energia potencial e cinética da água que é convertida em trabalho mecânico de rotação do eixo ao passar pela turbina. Vale ressaltar que a eficiência típica de uma turbina moderna varia entre 85% e 95%.

Alguns componentes podem ser considerados órgãos essenciais e comuns entre os tipos de turbinas. A Figura 4 ilustra as partes detalhadas a seguir para os principais tipos de máquinas:

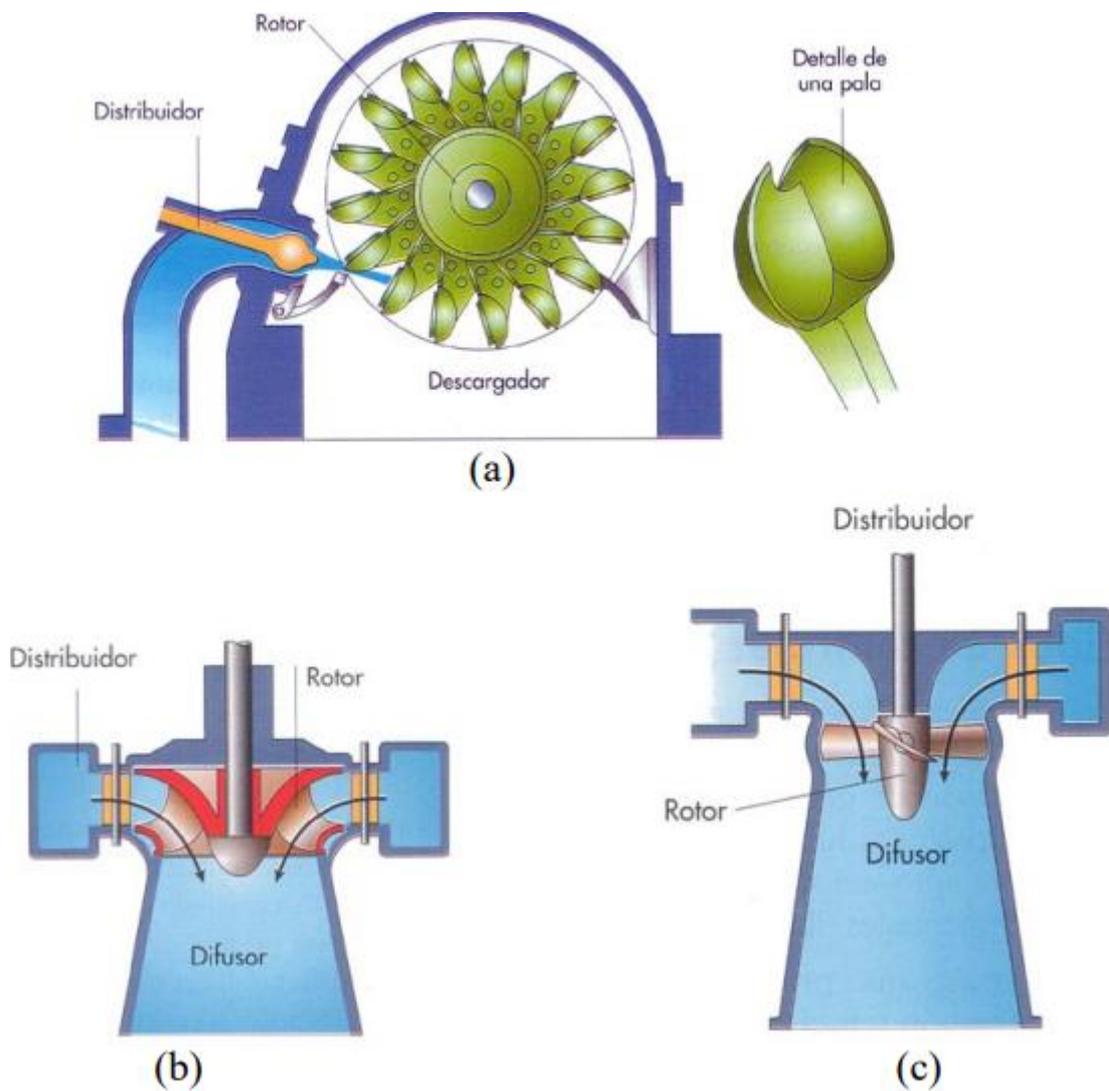
- Distribuidor: é um elemento fixo. Suas funções são: direcionar a água até o rotor segundo uma direção adequada; modificar a vazão através da alteração da seção de saída do distribuidor, indo de zero, fechado, até a abertura máxima; além da transformação total ou parcial da energia de pressão em energia cinética na entrada do rotor.

- Rotor ou roda: é um órgão móvel, gira em torno de um eixo. Está munido com um sistema de pás fixas ou móveis a um eixo e é responsável por transformar grande parte da energia hidráulica em trabalho mecânico.

- Difusor ou tubo de sucção: também é uma parte fixa e suas funções são: recuperar a altura entre a saída da roda e o nível do canal de fuga; recuperar parte da energia cinética correspondente a velocidade residual da água na saída da roda.

- Carcaça: é uma parte fixa. Conduz a água do conduto forçado até o distribuidor, garantindo descargas parciais iguais em todos os canais formados pelas pás do distribuidor.

Figura 4 - Componentes comuns entre as turbinas (a) Pelton, (b) Francis, (c) Kaplan



Fonte: Muñoz; Santos (2014).

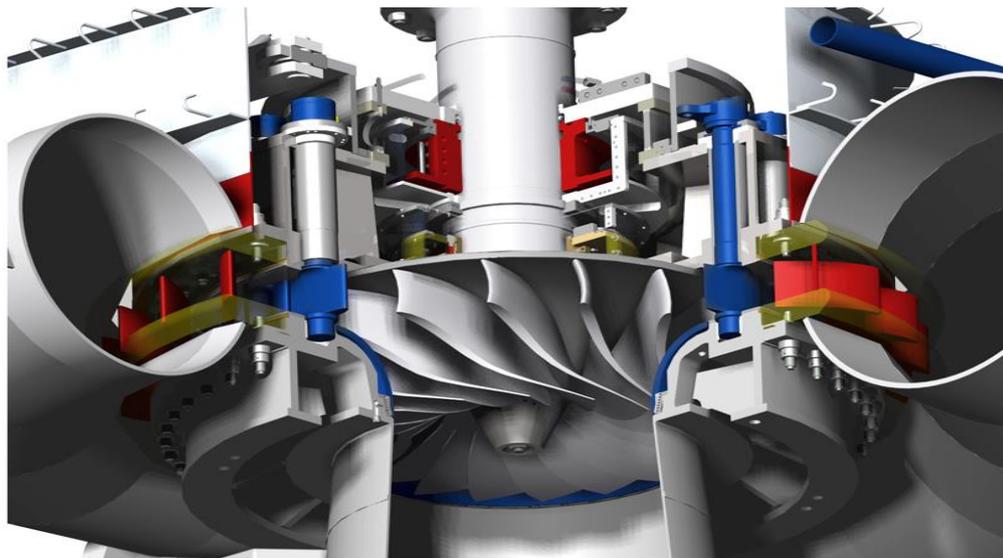
Tendo em vista os componentes básicos explicados anteriormente é importante ressaltar as particularidades dos principais modelos de turbinas, uma vez que é devido justamente a tais particularidades que é possível selecionar e aproveitar ao máximo uma turbina hidráulica para cada caso. Portanto os principais tipos de turbinas são:

2.2.1 Turbina Francis

As turbinas Francis são classificadas em relação a sua velocidade específica: lentas, normais, rápidas e extra rápidas. O grande diferencial para as turbinas Francis é o seu rotor, pois são constituídos por um certo número de pás com perfis de curvaturas especiais, fixas e

estruturadas entre as coroas internas e externas. Neste tipo de turbina, o fluxo de água é orientado e distribuído igualmente na direção radial, por toda a periferia da entrada do rotor, saindo na sua direção axial. Dentre as usinas brasileiras que utilizam esse modelo de turbina pode-se destacar Itaipu, Belo Monte e Ilha Solteira. A Figura 5 ilustra uma turbina Francis.

Figura 5 - Modelo 3D de uma Turbina Francis



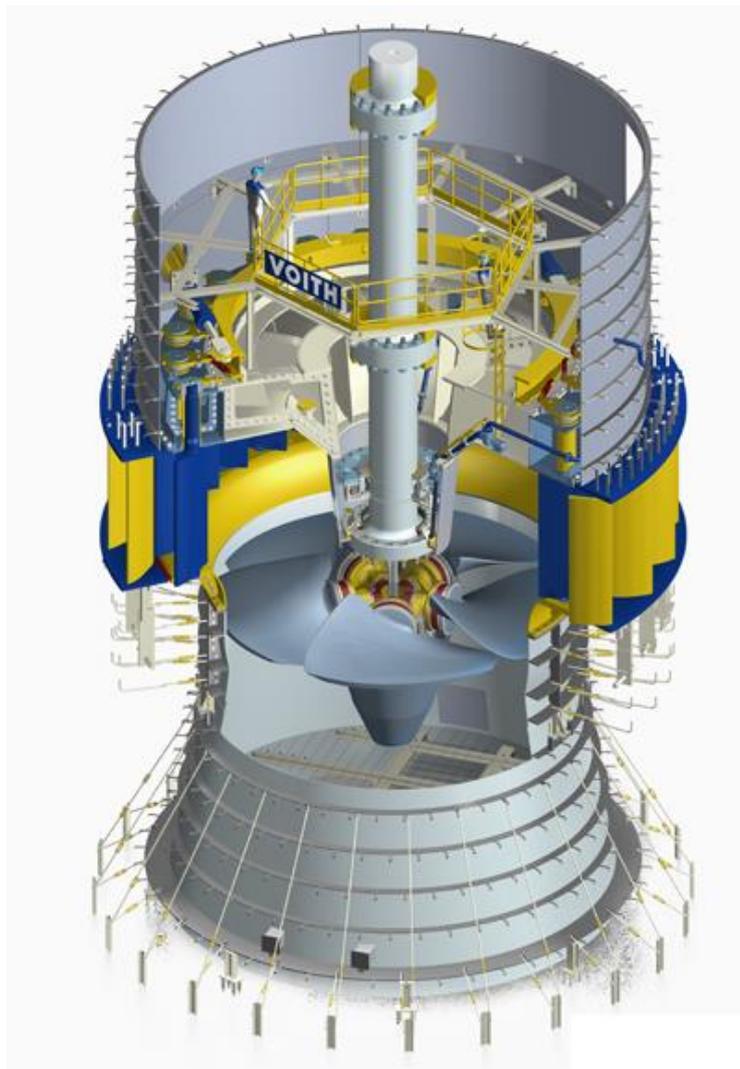
Fonte: Voith (2019).

2.2.2 Turbina Kaplan

Com a invenção de pás capazes de variar o passo, isto é, pás orientáveis, foi concebido um novo tipo de turbina para pequenas e médias quedas, com grandes descargas. O engenheiro Victor Kaplan em 1912 foi quem criou este novo modelo de turbina axial à hélice que atualmente é altamente utilizado no mercado. O mecanismo que permite variar o ângulo de inclinação das pás conforme a descarga, sem variação apreciável do rendimento, fica alojado numa peça com formato de ogiva e seu comando é realizado pelo regulador automático de velocidade, fora isso essa máquina é muito semelhante a turbina tipo Francis. (MACINTYRE, 1983).

Dentre as usinas que utilizam este modelo podem ser destacadas, Sobradinho, Três Marias e Porto Primavera. A Figura 6 apresenta uma turbina Kaplan.

Figura 6 - Modelo 3D de uma turbina Kaplan



Fonte: Voith (2019).

2.2.3 Turbina Bulbo

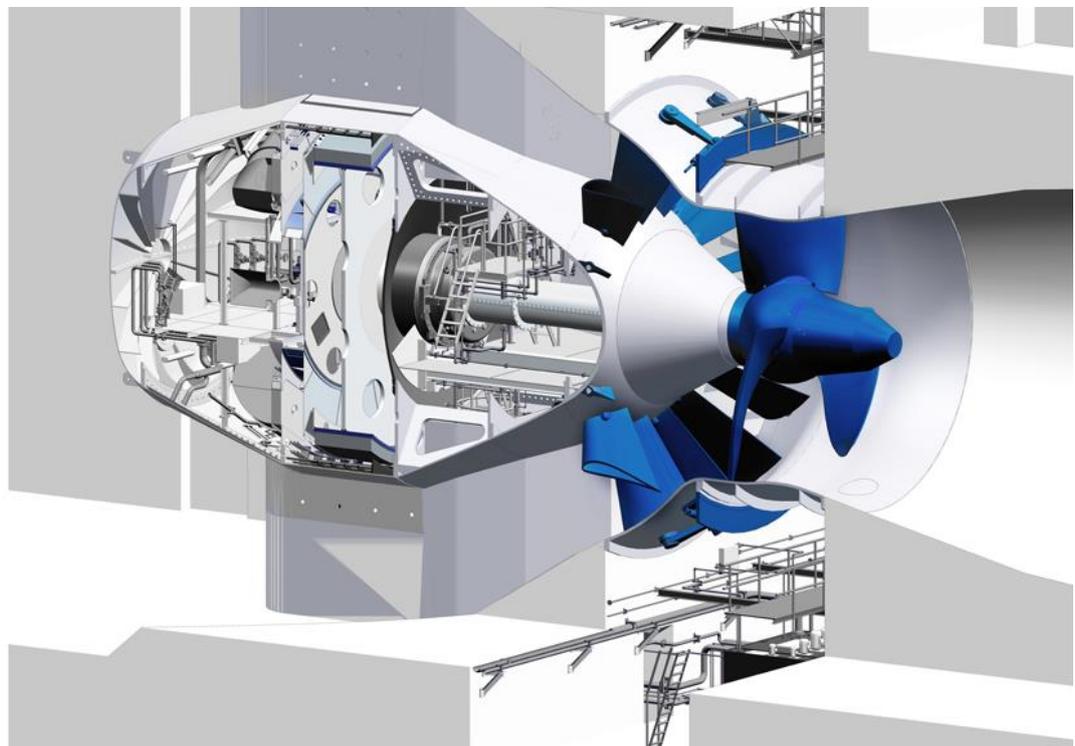
A turbina Bulbo é muito semelhante a uma turbina Kaplan, pois seu rotor também é composto por pás orientáveis, entretanto suas hélices estão acopladas com um eixo na horizontal, para que, desta forma, seja possível um aproveitamento em desníveis pequenos. Em se tratando do bulbo, que é uma câmara blindada, pode existir meramente um sistema de transmissão por engrenagens, para transmitir a potência de eixo da hélice para o gerador elétrico, ou como acontece nos tipos mais aperfeiçoados, no interior do bulbo fica o próprio gerador. A turbina bulbo dispensa a caixa em caracol e o trecho vertical do tubo de sucção. Por

este motivo o espaço ocupado em planta para este tipo de máquina é menor do que o de uma turbina Kaplan.

Um ponto interessante é o fato de que as turbinas Bulbo podem funcionar tanto como turbina quanto como bomba, o que permite o emprego em usinas maré – motrizes. (MACINTYRE, 1983).

Santo Antônio e Jirau no rio Madeira, Canoas I e II e Igarapava são usinas com este modelo de turbina. A Figura 7 ilustra uma turbina Bulbo.

Figura 7 - Modelo 3D de uma turbina Bulbo



Fonte: Voith (2019).

2.2.4 Turbina Pelton

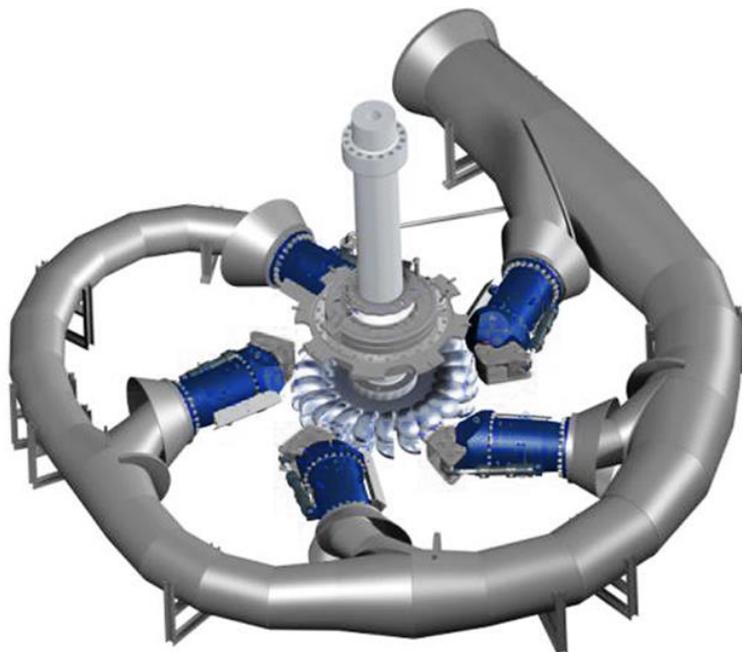
Sendo o principal exemplo de turbinas do tipo ação, a turbina Pelton é também chamada de jato. O rotor Pelton é constituído de uma coroa circular ao redor da qual são fixadas as pás. Essas pás também são conhecidas como conchas, pois têm o formato de uma colher dupla, como se fossem montadas lado a lado, formando um septo central. A altura de queda

aproveitada e a potência mecânica da turbina são os fatores que definem o número de conchas do rotor Pelton, seu diâmetro e rotação (SIMONE, 2000).

Basicamente, o funcionamento de um rotor Pelton se dá através da injeção de um jato d'água tangencialmente às conchas, conforme ilustrado na Figura 8, fazendo com que este seja dividido em duas partes iguais, movimentando o rotor Pelton.

As rodas Pelton são utilizadas tradicionalmente em aproveitamentos com altas quedas, porém sua utilização é baixa no Brasil, devido ao fato de não existirem muitas localidades que permitam seu uso, contudo um exemplo nacional típico é a usina Henry Borden em Cubatão/SP.

Figura 8 - Modelo 3D de uma turbina Pelton.



Fonte: Voith (2019).

2.3 GERADOR

Finalizando o detalhamento dos principais equipamentos que compõem uma usina hidrelétrica, pode-se afirmar que o gerador é a máquina que divide a importância com a turbina.

O tipo de gerador instalado em usinas hidrelétricas é o Gerador Síncrono, isto é, a máquina opera com uma velocidade sincronizada com a frequência da rede elétrica a qual está conectada. O gerador possui a função de converter a energia mecânica transformada pela turbina hidráulica em energia elétrica.

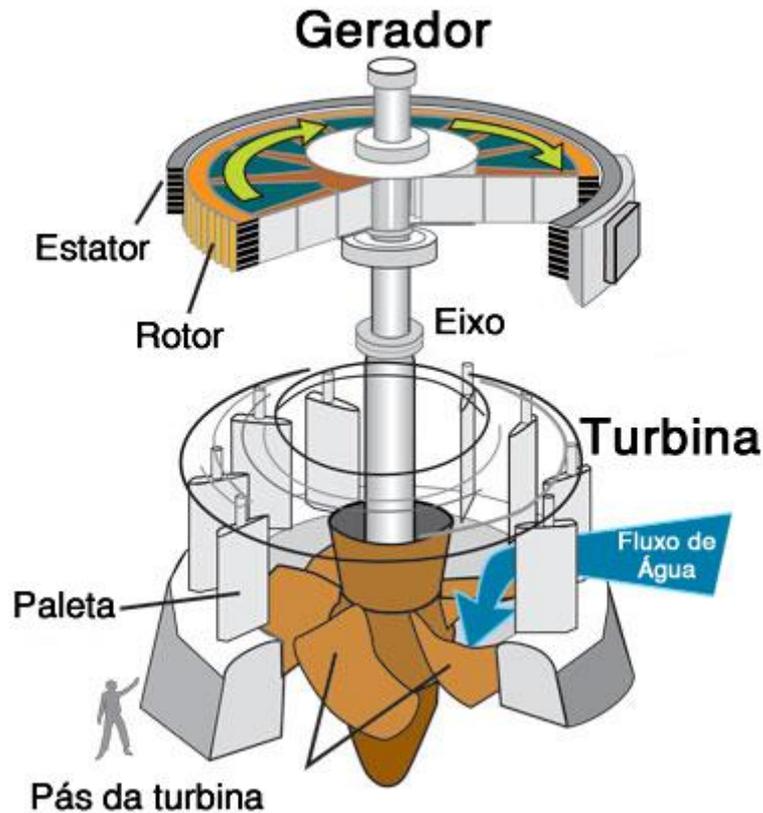
O conjunto formado por uma turbina hidráulica associado a um gerador, recebe o nome de unidade geradora.

Por fim, o gerador é destrinchado, basicamente, em duas partes:

- Rotor: Parte móvel da máquina que geralmente é constituído por um eixo conectado à uma estrutura mecânica capaz de suportar o anel magnético e os polos. Ao começar o movimento giratório, os polos possuem a função de gerar o campo magnético que induzirá corrente no enrolamento do estator e por fim gerar potência elétrica, sendo estes constituídos por um pacote de lâminas de um material ferromagnético envolto em um enrolamento constituído de condutores de cobre, designado como enrolamento de campo.
- Estator: Parte estática da máquina, montada em volta do rotor de forma que este possa girar no seu interior, também constituído por um pacote de lâminas de um material ferromagnético envolto num conjunto de enrolamentos distribuídos ao longo da sua circunferência e posicionados em ranhuras. Pelo estator circula toda a energia elétrica gerada, sendo que tanto a tensão quanto a corrente elétrica que circulam são bastante elevadas em relação ao campo (rotor) (RODRIGUES, 2014).

A Figura 9 representa o conjunto turbina gerador, destacando as principais partes de cada um.

Figura 9 - Representação 3D turbina acoplada ao gerador.



Fonte: Adaptado de ANEEL (2008).

Após detalhar as partes do principal conjunto de máquinas de uma usina hidrelétrica é importante compreender como a análise multicritério é capaz de fornecer um ranking de turbinas hidráulicas.

2.4 ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Os Métodos Multicritério de Tomada de Decisão (MCDM – Multiple Criteria Decision Making Methods), também conhecido como Análise de Decisão Multicritério (MCDA - Multiple Criteria Decision Analysis) será a metodologia aplicada ao estudo de caso deste trabalho, devido a sua versatilidade e benefícios no auxílio na tomada de decisão em casos onde há mais do que um critério.

Um dos métodos multicritério mais utilizados é o AHP - Analytic Hierarchy Process, possuindo as características de ser fácil de usar, mensurável, além do fato da estrutura em

hierarquia ser facilmente ajustável a vários tipos de problemas, não requerendo muita informação.

Este método consiste na comparação de pares com base no julgamento de especialistas para obter uma priorização das várias alternativas disponíveis. Os modelos multicritério tem sido amplamente utilizados também no setor do planeamento energético, especialmente para escolher/priorizar estratégias energéticas ou tecnologias (LOKEN, 2007).

2.4.1 Analytic Hierarchy Process - AHP

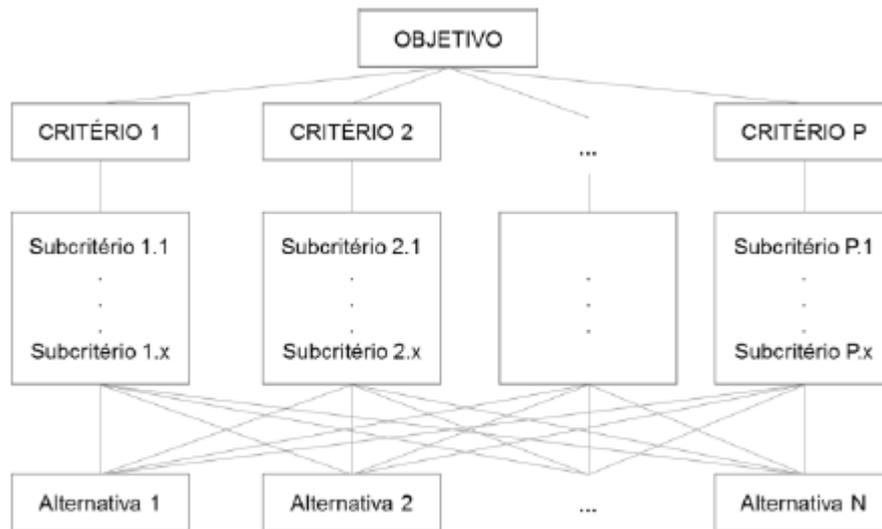
O AHP, foi uma técnica desenvolvida por Thomas L. Saaty, cujo trabalho no departamento de Defesa dos EUA, serviu como base para seu desenvolvimento.

Organizando percepções, sentimentos e juízos de valor, o AHP é um método de comparação quantitativo utilizado para selecionar a alternativa mais adequada, através da comparação destas considerando o seu desempenho em relação aos critérios definidos. Este método é um procedimento sistemático para representar os elementos de um problema hierarquicamente e alinha-se com a capacidade dos seres humanos produzirem julgamentos relativos mais precisos do que julgamentos absolutos (SARDINHA 2017).

O processo de aplicação do AHP consiste nos seguintes passos:

1. Deve-se construir uma hierarquia em que esteja representado o objetivo, os critérios, subcritérios e alternativas. Na figura 10 é possível observar a representação esquemática genérica deste primeiro passo.

Figura 10 - Esquema hierárquico genérico



Fonte: Sardinha (2017).

Este é um dos passos mais importantes do processo de tomada de decisão. No desenvolvimento desta estruturação é possível obter a percepção das relações existentes nos elementos que compõe cada situação específica (SAATY, 1990).

Segundo Saaty (1990), as hierarquias devem incluir um nível de detalhe capaz de:

- Representar o problema detalhadamente, mas não excessivamente para evitar perder sensibilidade à mudança de elementos;
- Considerar o ambiente que envolve o problema;
- Identificar os atributos que contribuem para a solução;
- Identificar os participantes associados com o problema.

Desta forma é possível decompor o problema em menores partes para guiar a decisão por meio de uma série de comparações par a par a fim de expressar o impacto dos vários elementos na hierarquia.

Os elementos de uma hierarquia devem ser comparados aos pares do mesmo nível, relativamente ao elemento do nível superior.

2. A informação oriunda das comparações entre elementos da hierarquia representa a opinião dos indivíduos que irão ter um papel determinante na tomada de decisão. Esta opinião

dá origem às comparações através da escala apresentada na Figura 11 e determina o grau de importância que um elemento tem sobre o outro, ou seja, se em uma comparação for atribuída uma importância de 5 significa que um elemento é fortemente mais importante ou dominante que o outro. Vale destacar que uma escala pode ser definida por três elementos: um conjunto de objetos, um conjunto de números e uma correlação entre os objetos e os números.

Figura 11 - Escala Fundamental

Intensidade da Importância	Definição	Explicação
1	Importância Igual	Dois elementos contribuem igualmente para o objetivo
2	Fraca	
3	Importância Moderada	Experiência e julgamento favorecem ligeiramente um elemento face ao outro
4	Mais Moderada	
5	Importância Forte	Experiência e julgamento favorecem fortemente um elemento face ao outro
6	Mais Forte	
7	Importância Muito Forte ou Demonstrada	Um elemento é favorecido muito fortemente face a outro; a sua dominância é demonstrada na prática
8	Muito Muito Forte	
9	Importância Extrema	A evidência que favorece um elemento face a outro é da mais alta ordem possível de afirmação.
Recíprocos	Se ao elemento i é atribuído um dos valores acima mencionados quando comparado com j, então a j será atribuído o valor inverso quando comparado com i	

Fonte: Sardinha (2017).

3. Os valores obtidos das comparações do tópico anterior são inseridos em uma matriz quadrada. Nesta matriz as linhas e colunas são preenchidas com as comparações entre elementos do mesmo nível, em relação ao nível seguinte. Por exemplo, os critérios em um primeiro nível da hierarquia são comparados entre si em relação ao objetivo da hierarquia, em seguida, os subcritérios são comparados relativamente ao critério correspondente do nível acima e assim sucessivamente até se chegar ao último nível de comparações; as alternativas são comparadas face aos subcritérios do nível imediatamente acima. Estes três níveis de

comparações originam matrizes distintas, estando uma delas representada genericamente na figura 12 (SAMPAIO, 2018).

Figura 12 - Representação genérica de uma matriz de comparações

$$\mathbf{A} = \begin{matrix} & \begin{matrix} j \\ \diagdown \\ i \end{matrix} & \mathbf{E}_1 & \mathbf{E}_2 & \dots & \mathbf{E}_n \\ \mathbf{E}_1 & & 1 & a_{12} & & \\ \mathbf{E}_2 & & a_{21} & 1 & & \\ \vdots & & & & \dots & \\ \mathbf{E}_n & & & & & 1 \end{matrix}$$

Fonte: Sardinha (2017).

Nesta matriz, representam-se por i as linhas e por j as colunas, sendo o valor a_{ij} a importância relativa atribuída. A diagonal principal será sempre preenchida com o valor numérico 1, pois qualquer elemento, comparado a si mesmo, é igualmente importante.

Se um elemento numa linha i é mais importante que um elemento numa coluna j , então o elemento da coluna é subentendido como a unidade e a matriz é preenchida com um valor numérico a_{ij} superior a 1 e de acordo com a correspondência da tabela. Quando a comparação inversa é realizada, o elemento menos importante recebe o inverso da importância atribuída no primeiro caso, ou seja, é imputado na matriz o valor recíproco de $1/a_{ij}$. Por exemplo se $a_{12} = 5$, conseqüentemente $a_{21} = 1/5$.

4. Em seguida, é calculado o autovetor da matriz, este que permite determinar qual a importância relativa de cada elemento em comparação. Tal vetor representa os pesos relativos dos elementos no resultado total do objetivo e é obtido por meio da normalização da matriz de comparação. Portanto, os seguintes passos devem ser seguidos:

4.1 Soma-se os valores de cada coluna da matriz de comparações

4.2 Divide-se cada elemento de uma coluna pelos respectivos resultados das adições feitas em 4.1

4.3 Soma dos elementos em cada linha normalizada e divisão dessa soma pelo número de elementos nessa linha. Os autovetores devem ser determinados para todas as matrizes de comparação existentes.

5. As opiniões dadas são subjetivas, sendo assim é necessário verificar a coerência das avaliações. Caso a Razão de Consistência (CR) seja superior a 0,1 as opiniões deverão ser revistas e todo o processo realizado novamente. Esta razão é calculada pela equação (2):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

O Índice de Consistência (CI) de uma matriz é definido pela equação (3):

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - N)}{(N-1)} \quad (3)$$

Sendo λ_{\max} o vetor próprio da matriz e N a sua dimensão, ou seja, o número de critérios, subcritérios ou alternativas em análise e para se obter o λ_{\max} devem ser seguidos os seguintes passos:

5.1 Calcular um vetor, denominado vetor das somas ponderadas, através multiplicação de cada coluna da matriz de comparação pelo respectivo peso do autovetor;

5.2 Os elementos do vetor das somas ponderadas, obtido em 5.1, devem ser divididos pelo respectivo peso de cada critério obtido em 4.3;

5.3 Calcular a média dos valores obtidos, encontrando a resposta final.

Uma informação necessária para as contas seria o Índice Aleatório ou Random Index (RI), que representa o índice de consistência de uma matriz gerada com aleatoriedade, na Figura 13 encontra-se os respectivos valores que embasam os dados mencionados previamente.

Figura 13 - Índice Aleatório (RI)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Fonte: Sardinha (2017).

2.4.2 Síntese Ideal

A síntese ideal é um grande avanço na prática do AHP, com esta modificação as propriedades não são normalmente distribuídas, isto é, a soma dos componentes dos vetores prioritários não será igual a um, ou seja, além do autovetor normalizado é possível aferir um autovetor idealizado capaz de maximizar a assertividade da resposta final (SALOMON, 2016).

Para encontrar os autovetores idealizados (AI), o autovetor normalizado de maior dominância receberá o valor 1, e os valores dos demais autovetores serão redistribuídos entre si.

Por exemplo, supondo uma matriz com três opções em que o autovetor normalizado da primeira opção (S1) seja o mais dominante, desta forma tem-se que $AI_1 = 1$. Em relação ao autovetor normalizado da segunda opção (S2), este receberá o resultado da divisão entre o autovetor normalizado da opção 2 pelo autovetor normalizado da opção 1, isto é, $AI_2 = S2/S1$.

Por fim, o mesmo acontecerá para a terceira opção (S3), mantendo sempre como fixo a opção de maior dominância, neste caso S1.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 METODOLOGIA

Pretende-se atender aos objetivos através de uma pesquisa ação, isto é, aplicar a metodologia AHP e verificar sua utilização em prol da melhor opção de turbina.

Os cálculos são realizados através do software Microsoft Excel e para a análise em questão, foram utilizadas informações genéricas e comuns às usinas hidrelétricas de baixa queda no Brasil, sendo que, parte dos exemplos e dados que serão trabalhados, são características similares aos da usina hidrelétrica de Santo Antônio de Jari. Desta forma utilizar-se-á como base, uma altura de queda entre 25 e 30 metros, uma vazão média anual de 1042 m³/s e uma potência de até 373 MW. (SILVEIRA, 2014).

Dado o projeto modelo, serão elencadas 3 opções de turbinas para aplicar o AHP, a primeira delas será justamente a máquina que é de fato utilizada na usina hidrelétrica de Jari, justamente para servir de comparação com as demais e teste de validação do método proposto. Logo, segundo o relatório de acompanhamento da ANEEL (2008), temos como alternativa:

- 3 Turbinas Kaplan verticais – $H = 29$ m; $\omega = 100$ rpm; $Q = 570$ m³/s;

Por fim, complementando os dados de entrada utilizando uma massa específica de 1000 kg/m³, constante gravitacional de 9,81 m/s², e eficiência entre 90% e 95%, é possível aplicar a Equação 1 e o gráfico apresentado na Figura 1, aferindo, desta forma, mais opções de turbinas. Outra informação que deve ser levado em consideração é o número de rotações que a turbina trabalhará, esta que por razões construtivas, emprega-se baixa velocidade real para turbinas de elevada velocidade específica.

Por conseguinte, será levado em consideração aproximações semelhantes às de Jari, logo, a partir destas informações pode-se considerar a potência nominal das máquinas um dos critérios do método AHP.

3.2 MODELAGEM PARA A DETERMINAÇÃO DE CUSTOS

Existem algumas formas de se fazer a precificação das turbinas, bem como aferir o custo das obras civis da casa de força, porém a complexidade é alta e existem diversas limitações

comerciais, pois cada empresa utiliza uma maneira de aferir estes preços, sendo altamente minuciosos.

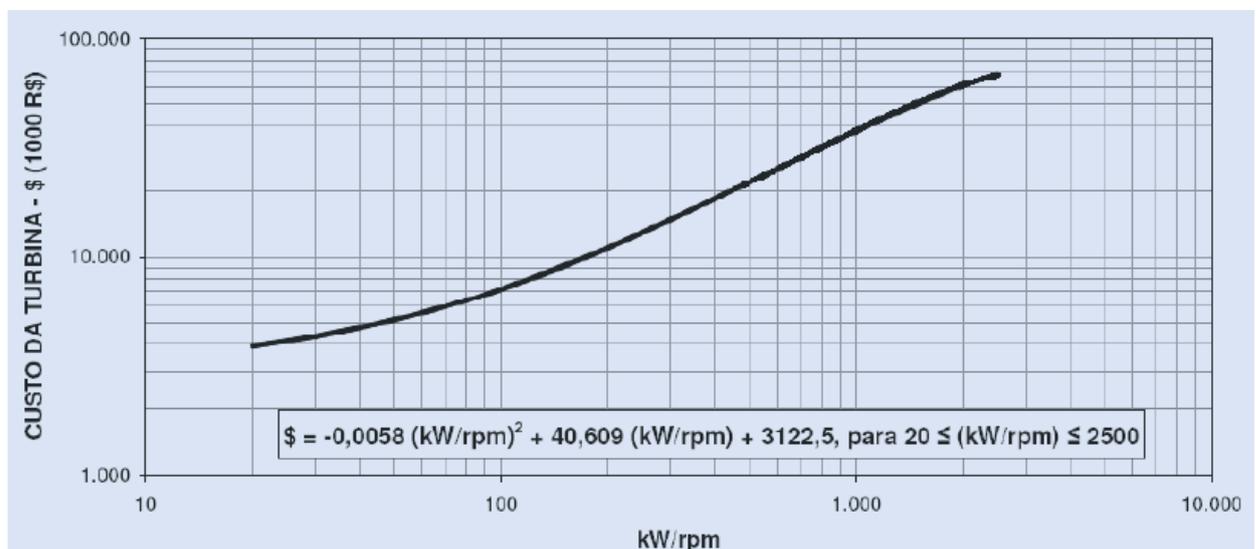
Portanto, estes respectivos valores serão baseados no Manual de inventário hidroelétrico de bacias hidrográficas feito pelo Ministério de Minas e Energia, edição 2007 publicado por MME/CEPEL (2007).

Através da metodologia apresentada no manual do MME/CEPEL (2007), os custos são obtidos através de gráficos, construídos a partir de valores médios do estudo feito em algumas usinas brasileiras.

Por fim, ao fornecer os dados de entradas definidos ou calculados pelo usuário é possível encontrar, seja pela curva ou equação da curva, o respectivo valor ou custo.

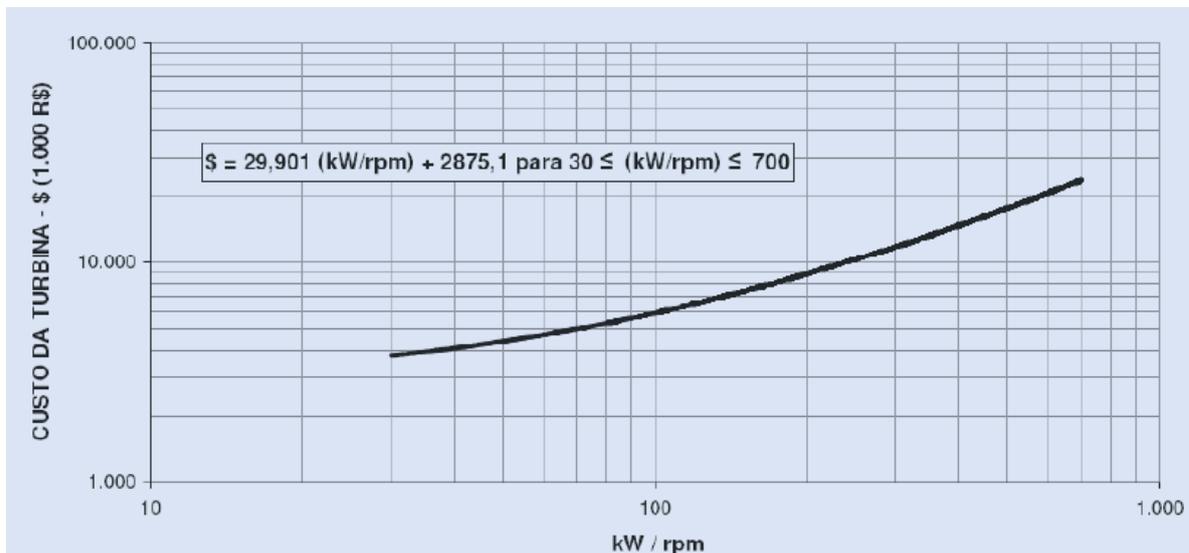
As Figuras 14 e 15 fornecem os custos das turbinas Kaplan e Bulbo respectivamente, utilizando como dados de entrada a potência nominal da turbina e da velocidade de rotação da máquina.

Figura 14 - Custos de Turbinas Kaplan



Fonte: MME/CEPEL (2007).

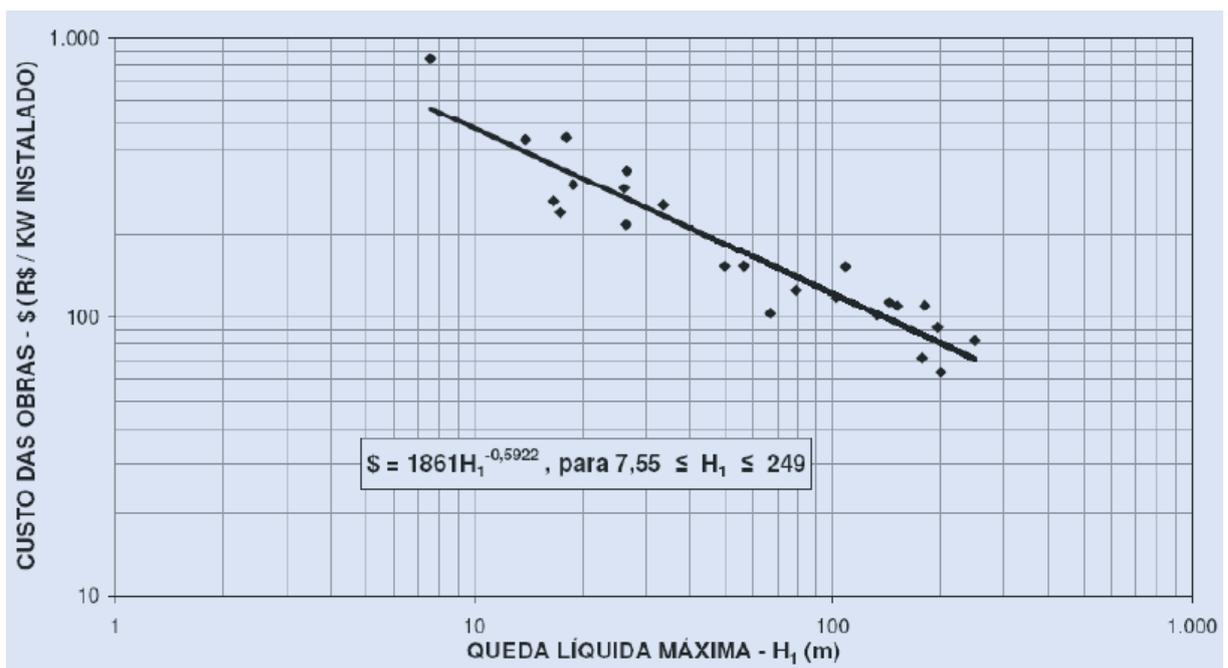
Figura 15 - Custos de Turbinas Bulbo



Fonte: MME/CEPEL (2007).

Por fim, a Figura 16 fornece o custo das obras civis da casa força, utilizando a altura de queda líquida como dado de entrada e no fim multiplicando-se o custo por kW instalado pela potência total da casa de força.

Figura 16 - Custo total das obras civis da casa de força



Fonte: MME/CEPEL (2007).

A equação da curva de todos os custos citados neste tópico consta nas próprias figuras.

A partir da metodologia apresentada, é possível considerar o preço das turbinas, bem como o custo civil das obras da casa de força, como critérios para determinar a turbina ideal.

Poder definir estes critérios de forma embasada é essencial pois, além de representar a principal problemática citada anteriormente, que é a falta de integração e comunicação entre as empresas responsáveis pelo maquinário da usina hidrelétrica com as empreiteiras que realizam a parte civil do projeto, o manual fornece um modo viável e confiável de se aferir os respectivos resultados e valores, que permitirão decompor o problema em menores partes para a análise em prol da melhor opção de turbina.

Um último critério para analisar no AHP é o prazo de entrega para a primeira unidade geradora, pois quanto antes a turbina entrar em operação, mais rapidamente acontecerá o retorno financeiro oriundo do fornecimento de energia elétrica. Este tempo varia de empresa para empresa, mas leva em média de 29 a 36 meses (ANEEL, 2018).

Por fim, os critérios elencados são:

- Potência
- Preço das Máquinas
- Custo da Casa de Força
- Prazo

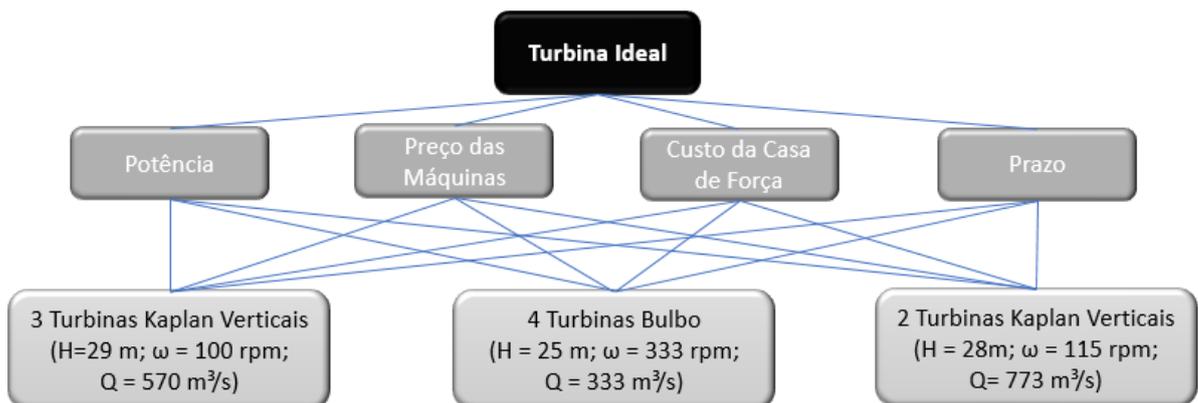
4 RESULTADO E DISCUSSÕES

Após definir a usina de Jari como modelo e utilizar das metodologias fluidodinâmicas explicadas no item 3.1, destacar-se-á como resultado 3 opções de turbinas:

- 3 Turbinas Kaplan verticais – $H = 29$ m; $\omega = 100$ rpm; $Q = 570$ m³/s;
- 4 Turbinas Bulbo – $H = 25$ m; $\omega = 333$ rpm; $Q = 333$ m³/s
- 2 Turbinas Kaplan verticais – $H = 28$ m; $\omega = 115$ rpm; $Q = 773$ m³/s

Portanto, combinando as alternativas com os critérios elencados previamente é possível construir a hierarquia do projeto em questão, representada pela Figura 17.

Figura 17 - Hierarquia para seleção da turbina hidráulica ideal



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Com os dados de entradas e alternativas definidas é possível encontrar os valores dos critérios ao aplicar a equação 1 e os gráficos representados pelas Figuras 14, 15 e 16, que também apresentam a equação das respectivas curvas. Desta forma obtém-se a Figura 18.

Figura 18 - Valores dos critérios atrelados a cada opção

	Potência Nominal (MW)	Preço das Máquinas (BRL)	Custo da Casa de Força (BRL)	Prazo (meses)
Opção 1: 3 Turbinas Kaplan Verticais (H=29 m; $\omega = 100$ rpm; Q = 570 m ³ /s)	125,9	R\$ 45.000.000,00	R\$ 31.900.000,00	36
Opção 2 4 Turbinas Bulbo (H = 25 m; $\omega = 333$ rpm; Q = 333 m ³ /s)	76,4	R\$ 10.000.000,00	R\$ 21.150.000,00	32
Opção 3 2 Turbinas Kaplan Verticais (H = 28m; $\omega = 115$ rpm; Q= 773 m ³ /s)	187,5	R\$ 54.000.000,00	R\$ 48.500.000,00	36

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Os prazos foram estipulados baseado no tempo médio em que as empresas do ramo levam para entregar cada tipo de turbina, logo a turbina bulbo entraria em funcionamento 4 meses antes que as demais opções, comercializando energia elétrica mais rapidamente e consequentemente viabilizando um retorno sobre o investimento também de forma mais rápida.

As matrizes de comparação a seguir contemplam a intensidade de importância criados a partir do juízo de valor do autor para cada critério em relação as 3 possíveis alternativas.

Tabela 1 - Matriz de comparação do critério potência nominal

Potência Nominal	Opção 1	Opção 2	Opção 3	Autovetor Normalizado	Autovetor Idealizado
Opção 1	1	7	4	0,70	1
Opção 2	0,14	1	0,33	0,09	0,13
Opção 3	0,25	3	1	0,21	0,30
Soma	1,39	11	5,33	1	1,43

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Após a realização das comparações, normalização e idealização do autovetor da matriz, verificar-se-á a inconsistência das avaliações. Portanto:

Tabela 2 - Verificação de inconsistência do critério potência nominal

Autovalor	Razão de Inconsistência	Índice de Inconsistência
3,05	0,03	0,05

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

O mesmo foi aplicado nos demais critérios e seus resultados encontram-se a seguir, desta forma tem-se:

Tabela 3 - Matriz de comparação do critério preço das máquinas

Preço das Máquinas	Opção 1	Opção 2	Opção 3	Autovetor Normalizado	Autovetor Idealizado
Opção 1	1	0,17	2	0,17	0,24
Opção 2	6	1	5	0,72	1
Opção 3	0,5	0,2	1	0,11	0,15
Soma	7,5	1,37	8	1	1,39

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Tabela 4 - Verificação de inconsistência do critério preço das máquinas

Autovalor	Razão de Inconsistência	Índice de Inconsistência
3,15	0,07	0,14

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Tabela 5 - Matriz de comparação do critério custo da casa de força – obra civil

Custo Casa de Força	Opção 1	Opção 2	Opção 3	Autovetor Normalizado	Autovetor Idealizado
Opção 1	1	0,2	2	0,17	0,23
Opção 2	5	1	7	0,74	1
Opção 3	0,5	0,14	1	0,09	0,12
Soma	6,5	1,34	10	1	1,35

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Tabela 6 - Verificação de inconsistência do critério custo da casa de força – obra civil

Autovalor	Razão de Inconsistência	Índice de Inconsistência
3,02	0,01	0,02

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Tabela 7 - Matriz de comparação do critério prazo

Prazo	Opção 1	Opção 2	Opção 3	Autovetor Normalizado	Autovetor Idealizado
Opção 1	1	0,33	1	0,2	0,33
Opção 2	3	1	3	0,6	1
Opção 3	1	0,33	1	0,2	0,33
Soma	5	1,66	5	1	1,66

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Tabela 8 - Verificação de inconsistência do critério prazo

Autovalor	Razão de Inconsistência	Índice de Inconsistência
3	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Após as análises par a par, compara-se os critérios entre si elencando o quão mais significativo e importante um critério é em relação ao outro, deste modo tem-se:

Tabela 9 - Matriz de comparação entre os critérios

	Potência Nominal	Preço das Máquinas	Custo Casa de Força	Prazo	Autovetor Normalizado
Potência Nominal	1	4	3	9	0,55
Preço das Máquinas	0,25	1	0,33	5	0,15
Custo Casa de Força	0,33	3	1	5	0,26
Prazo	0,11	0,2	0,2	1	0,04
Soma	1,69	8,2	4,53	20	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Tabela 10 - Verificação de inconsistência oriundo da comparação entre os critérios

Autovalor	Razão de Inconsistência	Índice de Inconsistência
4,23	0,08	0,09

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Uma vez terminada as definições de importância e pesos entre os critérios e opções, finaliza-se ponderando a melhor opção.

Tabela 11 - Matriz resultado da comparação entre as alternativas e critérios

	Potência Nominal	Preço das Máquinas	Custo Casa de Força	Prazo	Total
Opção 1	1	0,24	0,23	0,33	0,66
Opção 2	0,13	1	1	1	0,52
Opção 3	0,30	0,15	0,12	0,33	0,23
Ponderação	0,55	0,15	0,26	0,05	

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Por fim, foi encontrado como resposta final a opção 1, que é composta por 3 turbinas Kaplan verticais com um aproveitamento da altura de queda de 29 metros, rotação de 100 rpm e vazão de 570 m³/s.

O resultado obtido é plenamente satisfatório, pois a alternativa sugerida pela análise multicritério, conforme explicado no tópico 3.1, foi a de fato aplicada na usina hidrelétrica de Santo Antônio de Jari, o que evidencia acuracidade e justifica a aplicação do método AHP.

Vê-se que os critérios elencados no AHP foram capazes de atender este problema de forma notável, pois a alternativa 1 indicada, mesmo sendo a mais cara ao somar os custos totais envolvendo todas as máquinas, e portanto, sua escolha não se apresentara como algo óbvio, era de fato a turbina hidráulica ideal, permitindo que até mesmo um estudante, se baseando apenas em dados, possa aferir tal resultado de forma assertiva.

Vale ressaltar que, atualmente, este tipo de tomada de decisão é realizada através da vasta experiência dos profissionais e empresas envolvidos nesse setor, e conciliar esta experiência e perpetuar essa troca de conhecimento entre os profissionais novos e antigos é algo fundamental

para qualquer empresa, ou seja, a atuação destes trabalhadores são fundamentais e o diálogo entre a contratante e a contratada não é algo simples, porém atender os requisitos, escolher a melhor opção e negociar a turbina, podem vir a ser processos facilitados com as análises apresentadas neste trabalho.

Por fim, para se otimizar o processo de seleção de turbina a um nível ainda mais competitivo e robusto, seria interessante garantir uma abordagem com mais variáveis dentro dos critérios, como aspectos geológicos, benfeitorias, desvio e controle do rio, barragem, vertedouros entre outros custos civis.

5 CONCLUSÃO

Após o estudo dos resultados obtidos, é possível afirmar que os objetivos do trabalho foram cumpridos, pois através das informações detalhadas ao longo da revisão bibliográfica é possível compreender o funcionamento de uma usina hidrelétrica, bem como as principais dificuldades que envolvem a seleção de turbinas hidráulicas.

O método AHP se mostrou viável para analisar projetos de seleção de turbinas, pois no caso estudado a resposta indicada pela análise multicritério foi a de fato a aplicada na usina hidrelétrica de Santo Antônio de Jari.

Um ponto de destaque é o fato de que a metodologia contempla interesses comerciais e acadêmicos, atendendo a dificuldade de selecionar uma máquina em usinas de baixa queda, que é justamente os casos de maiores opções e dificuldades, porém a hierarquia proposta não deve ser algo fixo que se aplica a todos os casos, pois cada usina hidrelétrica é um projeto distinto, devendo sempre ser analisado cuidadosamente, ajustando os devidos critérios aos requisitos intrínsecos de cada projeto.

Fato é que o método AHP fora capaz de alinhar os dados e informações das usinas com a experiência dos profissionais, se apresentando como uma excelente opção para complementar as disparidades que envolvem os setores e empresas do ramo energético e civil em relação a construção de uma usina hidroelétrica, ou seja, se por ventura for incluso novos critérios, como benfeitorias e aspectos geológicos, o processo tem capacidade de se tornar ainda mais competitivo e robusto.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: ANEEL, 2008. 236 p.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Relatório de acompanhamento da implementação de empreendimentos de geração**. Brasília: ANEEL, 2018. 23 p.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Fiscalização nas obras da UHE Santo Antônio**. JESA - JARI ENERGETICA AS, 2009. Disponível em: http://www.consultaesic.cgu.gov.br/busca/dados/Lists/Pedido/Attachments/529542/RESPOSTA_PEDIDO_485000081472000-15_vol03.pdf. Acesso em: 01 nov. 2019.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia, Centrais Elétricas Brasileiras S.A - Eletrobrás. **Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas**. Brasília: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, 2000. 458 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia, CEPEL. **Manual de inventário hidroelétrico de bacias hidrográficas**: ed. 2007. Rio de Janeiro: E-papers, 2007. 686 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano decenal de expansão de energia 2021**. Brasília: MME/EPE, 2012. 387 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano nacional de energia 2030**: projeções. Brasília: MME/EPE, 2007. v. 2. 372 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano nacional de energia 2030**: geração hidrelétrica. Brasília: MME/EPE, 2007. v. 3. 210 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Potencial dos recursos energéticos no horizonte 2050**. Brasília: MME/EPE, 2018. v. 3. 184 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Estudos para a licitação da expansão da geração**: garantia física dos empreendimentos hidrelétricos: 1º leilão de energia nova A-5 de 2013. Brasília: EPE, 2013. 41 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Modelagem energética da UHE Sinop**. Brasília: MME/EPE, 2010. 29 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Nota técnica MME/SPD/05**. Brasília: MME, 2004. 10 p.

HENN, E.A.L. **Máquinas de fluido**. 2. ed. Porto Alegre: UFSM, 2006.

LIMA, J. M. **Usinas hidrelétricas**: diretrizes básicas para proteção e controle. Rio de Janeiro: Synergia, 2009. 126 p.

LOKEN, E. **Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems:** renewable and sustainable energy reviews. Noruega: Elsevier, 2007. p.1584-1595.

MACINTYRE, A. J. **Máquinas motrizes hidráulicas.** Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983. 649 p.

MUÑOZ, J.; SANTOS, R. **Guía de turbinas hidráulicas.** Mérida: Universidade de Los Andes, 2014. 79 p.

RODRIGUES, A. C. **Elaboração de uma metodologia para análise de viabilidade técnica e econômica para implantação de usinas hidrelétricas com aproveitamentos de baixa queda.** 2014. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, Pittsburgh, v. 1, n. 1, p. 83-98, 2008.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, Pittsburgh, v. 48. p. 29-46, 1990.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process.** New York: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, T. L. The modern science of multicriteria decision making and its practical applications: the AHP/ANP approach. **Operations Research**, Catonsville, v. 61, n. 5, p.1101-1118, 2013.

SAATY, T. L.; ERGU, D. When is a decision-making method trustworthy? criteria for evaluating multi-criteria decision-making methods. **International Journal of Information Technology and Decision Making**, v. 14, n. 6, p. 1171-1187, 2015.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G.; WHITAKER, R. Addressing with brevity criticism of the analytic hierarchy process. **International Journal of the Analytic Hierarchy Process**. Pittsburgh, v. 1, n. 1, p. 121-134, 2009.

SAATY, T.L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **Interfaces**. Pittsburgh, v. 24, n. 6, p.19-43, 1994.

SALOMON, V. A. P. Analytic hierarchy process. *In: MARINS, F. A. S. et al. (org.). Métodos de tomada de decisão com múltiplos critérios: aplicações na indústria aeroespacial/SOBRAPO – Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional.* São Paulo: Blucher Acadêmico, 2010. p. 21-39.

SALOMON, V. A. P. **Auxílio à decisão para a adoção de novas políticas de compras.** Relatório Técnico, DPD FEG UNESP 04/2000. Guaratinguetá, 2000, p. 11-12.

SALOMON, V. A. P. *et al.* Analytic hierarchy process applied to supply chain management. *In: DE FELICE, F.; SAATY, T. L.; PETRILLO, A. (ed.). Theory and applications of the analytic hierarchy process: a bibliometric study, procedia computer science.* Amsterdã, 2016. p. 1-16.

SALOMON, V. A. P.; TAMARICO, C. L.; MARINS, F. A. S. **Applications and theory of analytic hierarchy process: decision making for strategic decisions**. 2016. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/applications-and-theory-of-analytic-hierarchy-process-decision-making-for-strategic-decisions/analytic-hierarchy-process-applied-to-supply-chain-management>. Acesso em: 06 nov. 2019.

SAMPAIO, E. S. **Análise multicritério de alternativas de um novo curso superior em instituição de ensino tecnológico**. 2018. 24 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

SARDINHA, R. D. **Seleção de estratégia de sourcing em atividades de manutenção num parque eólico: uma análise multicritério**. 2017. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial) – Curso de Ciências de Engenharia e Gestão Industrial, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2017.

SIMONE, G. A. **Centrais e aproveitamentos hidrelétricos**. São Paulo: Erica, 2000.

SIQUEIRA, R. B. P. **Construção de diagramas de custos para PCH incorporando turbinas de mercado**. 2006. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Transmissão e Conversão de Energia) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.

SIQUEIRA, R. B. P. **Emissões de poluentes em centrais hidrelétricas: aspectos técnicos, econômicos e ecológicos**. 2015. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

VARGAS, R. **Utilizando a programação multicritério (AHP) para selecionar e priorizar projetos na gestão de portfólio**. Disponível em: https://ricardo-vargas.com/pt/articles/analytic-hierarchy-process/#available_files. Acesso em: 01 out. 2019.

VOITH. **Turbina bulbo/poço**. Disponível em: <http://www.voith.com/br/produtos-e-servicos/energia-hidreletrica/turbinas/turbinas-bulbopoco-565.html>. Acesso em: 10 jul. 2019.

VOITH. **Turbina francis**. Disponível em: <http://voith.com/br/produtos-e-servicos/energia-hidreletrica/turbinas/turbinas-francis-561.html>. Acesso em: 11 jun. 2019.

VOITH. **Turbina kaplan**. Disponível em: <http://voith.com/br/produtos-e-servicos/energia-hidreletrica/turbinas/turbinas-kaplan-560.html>. Acesso em: 07 jul. 2019.

VOITH. **Turbina pelton**. Disponível em: <http://www.voith.com/br/produtos-e-servicos/energia-hidreletrica/turbinas/turbinas-pelton-563.html>. Acesso em: 17 jul. 2019.