

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E
SISTEMAS**

RUDIMAR CARICIMI

**PRÉ-SELEÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS UTILIZANDO AHP
E *FUZZY*-VIKOR**

DISSERTAÇÃO

PATO BRANCO

2019

RUDIMAR CARICIMI

**PRÉ-SELEÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS UTILIZANDO AHP
E FUZZY-VIKOR**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco.

Orientador: Prof. Dr. Dalmarino Setti.

PATO BRANCO

2019

C277p Caricimi, Rudimar.
Pré-seleção de turbinas hidráulicas utilizando AHP e *Fuzzi-VIKOR* /
Rudimar Caricimi. – 2019.
118 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Dalmarino Setti
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas.
Pato Branco, PR, 2019.
Inclui bibliografia.

1. Processo decisório por critério múltiplo. 2. Turbinas hidráulicas. 3.
Energia - Fontes alternativas. I. Setti, Dalmarino, orient. II. Universidade
Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção e Sistemas. III. Título.

CDD 22. ed. 670.42

Ficha Catalográfica elaborada por
Suélem Belmudes Cardoso CRB9/1630
Biblioteca da UTFPR Campus Pato Branco



TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 57

A Dissertação de Mestrado intitulada "**Pré-seleção de turbinas hidráulicas utilizando AHP e Fuzzy-VIKOR**", defendida em sessão pública pelo candidato **Rudimar Caricimi**, no dia 06 de dezembro de 2019, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, área de concentração Gestão dos Sistemas Produtivos, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Dalmarino Setti - Presidente - UTFPR

Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Trentin - UTFPR

Profª Drª Marcia Danieli Szeremeta Spak – UTFPR

Prof. Dr. Oswaldo Honorato de Souza Junior - UNIFEI

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Pato Branco, 11 de fevereiro de 2020.

Prof. Dr. Fernando José Avancini Schenatto
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas

Dedico esta dissertação à minha família, em especial a minha esposa Ana Paula, por me encorajar e acreditar até mais do que eu mesmo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por permitir concluir mais este projeto da vida.

Agradecimento à UTFPR e aos professores do PPGEPS, por acreditar no propósito e capacidade deste eterno aluno.

Agradecimento à banca de avaliação: Prof. Dr. Dalmarino Setti, Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Trentin, Prof^a. Dra. Marcia Danieli Szeremeta Spak e Prof. Dr. Oswaldo Honorato de Souza Junior, por contribuir significativamente na qualidade deste dissertação.

Agradeço imensamente ao meu orientador, professor e amigo, Dr. Dalmarino Setti, pelos ensinamentos, pela persistência e paciência para comigo.

Agradecimento notório à minha família, por ter me incentivado e compreendido os momentos de minha ausência.

Agradeço aos colegas do programa de mestrado, por dividir comigo, além dos conteúdos, aflições e angústias, também os momentos de distração nos intervalos de almoço.

Agradecimento aos especialistas entrevistados pela disponibilidade em participar deste processo.

Agradecimento aos amigos e colegas de profissão Arno Fink, Leandro José Possamai, Ricardo Cyrino Ramos e demais colegas, ainda que não aqui citados, por contribuir com seus conhecimentos técnicos e práticos sobre Turbinas Hidráulicas.

Agradecimento à empresa WEG Equipamentos Elétricos S.A. por permitir que eu conciliasse estudo e trabalho, possibilitando me ausentar sempre que necessário.

A todos que de alguma maneira contribuíram para a conclusão desta dissertação.

*“Thinking is the hardest work there is, which is probably the reason why so few
engage in it.”*

“Pensar é o trabalho mais difícil que existe, provavelmente motivo pelo qual tão
poucos se dedicam a ele”.

(Henry Ford)

RESUMO

As pequenas usinas hidrelétricas têm grande importância no cenário de geração de energia renovável no Brasil. Para que os estudos iniciais reproduzam mais fielmente a solução a ser empregada na construção, a pré-seleção da turbina hidráulica se torna essencial na elaboração do projeto básico destes empreendimentos. O método tradicional de seleção de turbinas tem abordagem extremamente técnica, sem considerar os aspectos de preferência do investidor. Isso, por vezes, acaba por demandar retrabalhos com revisões no projeto básico. O objetivo desta dissertação consiste em desenvolver um modelo de pré-seleção de turbinas hidráulicas por meio de uma abordagem multicritério, utilizando os métodos AHP (*Analytic Hierarch Process*) e *Fuzzy-VIKOR* (*ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*) para situações em que os dados técnicos de altura de queda e vazão, disponíveis para instalação do empreendimento, representem conflito na escolha das configurações existentes. Na metodologia uma abordagem estruturada, com base no método Proknow-C (*Knowledge Development Process – Constructivist*), foi utilizada para seleção das referências de estudo. Um modelo multicritério foi proposto para utilização em casos de valores de queda de 20 a 35 m e vazão de 10 e 30 m³/s. Para construção do modelo, foram utilizados os métodos AHP, para definição da importância dos critérios (pesos), a partir das avaliações de especialistas em empreendimentos hidrelétricos, e o método *Fuzzy-VIKOR*, para classificação das alternativas a partir dos julgamentos dos especialistas em relação ao desempenho das turbinas hidráulicas, nas variantes Francis Horizontal Simples (FHS), Francis Horizontal Dupla (FHD), Francis Vertical (FV), Kaplan S-Montante (KSM) e Kaplan S-Jusante (KSJ), em relação aos critérios. Como principais resultados da dissertação, foram apresentados dezesseis novos critérios de seleção de turbinas hidráulicas na etapa de pré-seleção, os quais estão divididos em quatro grupos de critérios: Desempenho (C₁), Custo Turbina-Gerador (C₂), Custo de Equipamentos Periféricos (C₃) e o grupo de critérios Custo da Construção Civil (C₄). O resultado da aplicação do modelo desenvolvido foi admitido como solução geral. Um estudo de caso foi realizado para verificar a aplicabilidade do modelo. No estudo de caso, foram verificadas as preferências do investidor quanto a relação entre critérios, por meio do método AHP, e o resultado da análise de desempenho das alternativas fornecida pelos especialistas, foi empregada na aplicação do método *Fuzzy-VIKOR*. A aplicação do modelo para uma solução geral, apresentou a seguinte solução: A1 > A4 > A2 > A5 > A3. Com base na avaliação dos indicadores de vantagem aceitável e estabilidade aceitável do método *Fuzzy-VIKOR* apenas a alternativa A1 - Francis Horizontal Simples (FHS) é aceita como solução de compromisso única da pré-seleção. Para o estudo de caso foram avaliados três cenários distintos em relação a estratégia de decisão: a de neutralidade quanto a preferência pelos benefícios associados a decisão ou minimização dos prejuízos associados a escolha ($v = 0,5$); o cenário de priorização dos benefícios associados a decisão ($v = 0,7$); e o cenário de minimização dos prejuízos associados a escolha ($v = 0,3$). O resultado para os três cenários avaliados foi o mesmo sendo: A1 > A2 > A3 > A4 > A5. A verificação quanto ao atendimento aos indicadores de vantagem aceitável e estabilidade aceitável do método *Fuzzy-VIKOR*, apresentam as alternativas A1 - Francis Horizontal Simples (FHS) e A2 - Francis Horizontal Dupla (FHD), como solução de compromisso da pré-seleção.

Palavras-chave: AHP, *Fuzzy-VIKOR*, Métodos de Decisão Multicritério, PCH, CGH, Turbinas Hidráulicas

ABSTRACT

Small hydroelectric plants are of great importance in the scenario of renewable energy generation in Brazil. In order to better reproduce the solution to be used in the construction, the pre-selection of the hydraulic turbine becomes essential in the elaboration of the basic project of these enterprises. The traditional method of selecting turbines has an extremely technical approach, without considering the aspects of investor preference, this sometimes ends up requiring rework with revisions to the basic design. The main objective of this dissertation is to develop a pre-selection model for hydraulic turbines using a multicriteria approach, using the AHP (Analytic Hierarchy Process) and Fuzzy-VIKOR (VišeKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) methods for situations in which technical data drop height and flow, available for installation of the project, represent conflict in the choice of existing configurations. In the methodology, a structured approach, based on the Proknow-C method (Knowledge Development Process - Constructivist), was used to select the study references. A multicriteria model has been proposed for use in cases of drop values of 20 to 35 m and flow rates of 10 and 30 m³/s. For the construction of the model, the AHP methods were used to define the importance of the criteria (weights), based on expert assessments in hydroelectric projects. The Fuzzy-VIKOR method was used, to classify alternatives based on expert judgments regarding performance of hydraulic turbines in the Simple Horizontal Francis (FHS), Double Horizontal Francis (FHD), Vertical Francis (FV), Kaplan Upstream S-Type (KSM) and Kaplan Downstream S-Type (KSJ) variants against the criteria. As main results of the dissertation, sixteen new hydraulic turbine selection criteria were presented in the pre-selection stage, which were divided into four groups of criteria: Performance (C1), Turbine-Generator Cost (C2), Peripheral Equipment Cost (C3) and the group of criteria Cost of Construction (C4). The result of applying the developed model was admitted as a general solution, so a case study was carried out to verify the applicability of the model. In the case study, the investor's preferences regarding the relationship between criteria, using the AHP method, and the result of the performance analysis of the alternatives provided by the specialists were used in the application of the Fuzzy-VIKOR method. The application of the model for a general solution, presented the following solution: A1 > A4 > A2 > A5 > A3. Based on the evaluation of the indicators of acceptable advantage and acceptable stability of the Fuzzy-VIKOR method, only the alternative A1 - Simple Horizontal Francis (FHS) is accepted as a single pre-selection compromise solution. For the case study, three different scenarios were evaluated about the decision strategy: neutrality regarding the preference for the benefits associated with the decision or minimizing the losses associated with the choice ($v = 0.5$); the scenario for prioritizing the benefits associated with the decision ($v = 0.7$); and the scenario of minimizing the losses associated with the choice ($v = 0.3$). The results for the three scenarios evaluated were the same: A1 > A2 > A3 > A4 > A5. The verification of compliance with the indicators of acceptable advantage and acceptable stability of the Fuzzy-VIKOR method presents the alternatives A1 - Simple Horizontal Francis (FHS) and A2 - Double Horizontal Francis (FHD), as a pre-selection compromise solution.

Keywords: AHP Weighting, Fuzzy-VIKOR, Multicriteria Decision Making, Small Hydro, Hydraulic Turbines

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 1 - Pré-seleção de turbinas hidráulicas | 22 |
| Figura 2 - Arranjo esquemático de aproveitamento hidrelétrico – Tipo Central de Represamento..... | 26 |
| Figura 3 - Esquemas de Construção de Usinas Hidrelétricas: (a) Central de Represamento; (b) Usinas Hidrelétricas a Fio d'Água; (c) Usinas de Desvio; (d) Usinas de Derivação | 29 |
| Figura 4 - Estrutura de usina hidrelétrica com barragem..... | 31 |
| Figura 5 - Fluxograma de instalação de pequenas usinas | 34 |
| Figura 6 - Etapa inicial de implantação de uma pequena usina | 35 |
| Figura 7 - Classificação das Turbinas Hidráulicas..... | 37 |
| Figura 8 - Forma dos Rotores Francis..... | 39 |
| Figura 9 - Partes de uma Turbina Francis | 40 |
| Figura 10 - Conjunto turbina Francis com eixo horizontal: (a) FHS; (b) FHD | 40 |
| Figura 11 - Turbinas Francis: (a) Francis Horizontal Simples; (b) Francis Horizontal Dupla; (c) Francis Vertical | 41 |
| Figura 12 - Partes de uma turbina Kaplan Vertical..... | 42 |
| Figura 13 - Modelos de turbinas tubulares: (a) Kaplan S-Montante; (b) Kaplan S-Jusante; (c) Kaplan S-Vertical; (d) Poço ou <i>Open Pit</i> ; (e) Bulbo | 43 |
| Figura 14 - Turbinas Tubulares: (a) KSV; (b) KSM; (c) KSJ | 44 |
| Figura 15 - Ábaco de pré-seleção de turbinas hidráulicas..... | 48 |
| Figura 16 - Gráficos de pré-seleção de turbinas por fornecedores | 49 |
| Figura 17 - Estrutura dos números <i>Fuzzy</i> : (a) Número <i>Fuzzy</i> triangular; (b) Número <i>Fuzzy</i> trapezoidal; (c) Número <i>Fuzzy</i> Pentagonal..... | 56 |
| Figura 18 - Termos das variáveis linguísticas | 56 |
| Figura 19 - <i>Framework</i> da dissertação..... | 59 |
| Figura 20 - Escopo resumido da Revisão Sistemática e Análise Bibliométrica | 61 |
| Figura 21 - Resumo da revisão sistemática | 62 |
| Figura 22 - Aplicação de turbinas hidráulicas..... | 63 |
| Figura 23 - Grupos de Critérios | 79 |
| Figura 24 - Modelo de pré-seleção de turbinas hidráulicas..... | 80 |
| Figura 25 - Comparação entre grupos de critérios. | 114 |
| Figura 26 - Comparação entre critérios do grupo Eficiência Energética..... | 115 |

| | |
|---|-----|
| Figura 27 - Comparação entre critérios do grupo Custo Turbina-Gerador. | 116 |
| Figura 28 - Comparação entre critérios do grupo Custo Equipamento Periféricos.. | 117 |
| Figura 29 - Comparação entre critérios do grupo Custo de Construção Civil..... | 118 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 - Participação dos modelos de turbina por range da vazão..... | 64 |
| Tabela 2 - Índice Harmônico Randômico (HRI) para valores de Matrizes (n) | 67 |
| Tabela 3 - Variável Linguística e Número <i>Fuzzy</i> Triangular | 69 |
| Tabela 4 - Peso dos critérios normalizados..... | 81 |
| Tabela 5 - Peso dos critérios normalizados..... | 92 |
| Tabela 6 - Comparativo de peso dos critérios | 100 |
| Tabela 7 - Comparativo da Classificação <i>Fuzzy</i> para as alternativas A1 e A2..... | 101 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 - Campo de aplicação dos diversos tipos de turbinas | 46 |
| Quadro 2 - Escala de Saaty. | 65 |
| Quadro 3 - Classificação <i>Fuzzy</i> para as alternativas em relação a cada critério | 83 |
| Quadro 4 - Avaliação das alternativas com número <i>Fuzzy</i> | 85 |
| Quadro 5 - Agregação dos julgamentos de desempenho das alternativas | 87 |
| Quadro 6 - Distâncias d_i das alternativas | 88 |
| Quadro 7 - Normalização ponderada de desempenho das alternativas com peso agregado | 89 |
| Quadro 8 - Valores máximos e mínimos de S^* , S^- , R^* , R^- | 90 |
| Quadro 9 - Valores de mérito <i>Fuzzy</i> (Q_j) | 90 |
| Quadro 10 - Defuzificação..... | 90 |
| Quadro 11 - Classificação das alternativas | 91 |
| Quadro 12 - Normalização ponderada de desempenho das alternativas com peso agregado – Estudo de Caso..... | 94 |
| Quadro 13 - Valores máximos e mínimos de S^* , S^- , R^* , R^- – Estudo de Caso..... | 95 |
| Quadro 14 - Valores de mérito <i>Fuzzy</i> (Q_j) – Estudo de Caso – Cenário 1..... | 95 |
| Quadro 15 - Defuzificação – Estudo de Caso – Cenário 1 | 96 |
| Quadro 16 - Valores de mérito <i>Fuzzy</i> (Q_j) – Estudo de Caso – Cenário 2..... | 97 |
| Quadro 17 - Defuzificação – Estudo de Caso – Cenário 2 | 97 |
| Quadro 18 - Valores de mérito <i>Fuzzy</i> (Q_j) – Estudo de Caso – Cenário 3 | 98 |
| Quadro 19 - Defuzificação – Estudo de Caso – Cenário 3 | 98 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------------|---|
| ABNT | - Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AHP | - <i>Analytic Hierarch Process</i> |
| ANEEL | - Agência Nacional de Energia Elétrica |
| CAPES | - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior |
| CGH | - Centrais de Geração Hidrelétrica |
| DM | - <i>Decision Maker</i> |
| ELECTRE | - <i>ELimination Et ChoixTraduisant la REalité</i> |
| Eletrobrás | - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. |
| FHD | - Francis Horizontal Dupla |
| FHS | - Francis Horizontal Simples |
| FMCDM | - <i>Fuzzy Multiple Criteria Decision Making</i> |
| FV | - Francis Vertical |
| g | - Aceleração gravitacional |
| H | - Altura de queda líquida |
| H _b | - Altura de queda bruta |
| HCI | - Índice de Consistência Harmônica |
| HCR | - Razão de Consistência Randômica |
| HM | - Média harmônica |
| HRI | - Índice Randômico de Consistência |
| h _s | - Altura de sucção |
| IDH | - Índice de Desenvolvimento Humano |
| IEC | - <i>InternationalElectrotechnicalCommission</i> |
| IEEE | - <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> |
| J | - Perdas |
| KS | - Kaplan "S" |
| KSJ | - Kaplan "S" Jusante |
| KSM | - Kaplan "S" Montante |
| KSV | - Kaplan "S" Vertical |
| KV | - Kaplan Vertical |
| LI | - Licença de Instalação |
| LP | - Licença Prévia |

| | |
|-----------|--|
| LO | - Licença de Operação |
| MCDM | - <i>MultipleCriteriaDecisionMaking</i> |
| MME | - Ministério de Minas e Energia |
| msnm | - Metro sobre o nível do mar |
| NAj | - Nível de Água a jusante |
| NAm | - Nível de Água a montante |
| NBR | - Norma Brasileira |
| n_g | - Eficiência do Gerador |
| n_q | - Velocidade específica baseada na vazão |
| n_s | - Velocidade específica baseada na potência |
| N_t | - Nível de instalação da Turbina |
| n_T | - Eficiência Global |
| n_t | - Eficiência da Turbina |
| P | - Potência |
| PB | - Projeto Básico |
| PCH | - Pequenas Centrais Hidrelétricas |
| PE | - Projeto Executivo |
| Proknow-C | - <i>KnowledgeDevelopmentProcess – Constructivist</i> |
| PROMETHEE | - <i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation</i> |
| RI | - Índice Randômico |
| Q | - Vazão |
| SAE | - Sistemas Auxiliares Elétricos |
| SAM | - Sistemas Auxiliares Mecânicos |
| SJR | - <i>ScientificJournal Rankings</i> |
| TOPSIS | - <i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i> |
| UHE | - Usina Hidrelétrica |
| VIKOR | - <i>Vlse Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje</i> |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 OBJETIVOS..... | 20 |
| 1.1.1 Objetivo Geral..... | 20 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos..... | 20 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA..... | 20 |
| 1.3 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO | 22 |
| 1.4 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA | 23 |
| 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 24 |
| 2 REFERENCIAL TEÓRICO | 25 |
| 2.1 PEQUENAS HIDRELÉTRICAS | 25 |
| 2.1.1 Aproveitamento Hidrelétrico..... | 26 |
| 2.1.2 Arranjos Construtivos de Pequenas Usinas Hidrelétricas..... | 28 |
| 2.1.3 Principais Estruturas de uma Pequena Usina Hidrelétrica..... | 30 |
| 2.1.4 Etapas de Implantação de Pequenas Usinas Hidrelétricas | 31 |
| 2.2 TURBINAS HIDRÁULICAS..... | 35 |
| 2.2.1 Turbinas Francis | 38 |
| 2.2.2 Turbinas Kaplan..... | 41 |
| 2.3 MÉTODO TRADICIONAL PARA PRÉ-SELEÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS | 44 |
| 2.4 MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO COMPENSATÓRIOS..... | 51 |
| 2.5 ABORDAGEM DOS CONJUNTOS DIFUSOS (<i>FUZZY SETS</i>) | 54 |
| 3 METODOLOGIA | 58 |
| 3.1 <i>FRAMEWORK</i> PROPOSTO PARA A CONSTRUÇÃO DO MODELO..... | 58 |
| 3.2 BASE DE DADOS PARA A DETERMINAÇÃO DOS CRITÉRIOS DA PRÉ- SELEÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS | 60 |
| 3.3 DEFINIÇÃO DAS ALTERNATIVAS | 62 |
| 3.4 MODELO DE PRÉ-SELEÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS..... | 64 |
| 3.4.1 Determinação do Peso dos Critérios com Método AHP | 65 |
| 3.4.2 Avaliação das Alternativas..... | 68 |
| 3.4.3 Método <i>Fuzzy</i> -VIKOR..... | 69 |
| 3.5 APLICAÇÃO DO MODELO DE PRÉ-SELEÇÃO | 72 |

| | |
|---|------------|
| 3.5.1 Estudo de Caso | 73 |
| 4 RESULTADOS | 74 |
| 4.1 MODELO GLOBAL | 74 |
| 4.1.1 Determinação dos Critérios da Pré-Seleção de Turbinas Hidráulicas | 74 |
| 4.1.1.1 Grupo de Critérios de Desempenho | 75 |
| 4.1.1.2 Grupo de Critérios de Custo da Turbina-Gerador | 76 |
| 4.1.1.3 Grupo de Critérios de Custo de Equipamentos Periféricos | 77 |
| 4.1.1.4 Grupo de Critérios de Custo da Construção Civil | 78 |
| 4.1.2 Peso dos Critérios | 81 |
| 4.1.3 Desempenho das alternativas | 82 |
| 4.1.4 Resultado da Solução Geral | 84 |
| 4.2 ESTUDO DE CASO | 92 |
| 4.2.1 Cenário 1 – Neutralidade da Preferência | 95 |
| 4.2.2 Cenário 2 – Priorização dos Benefícios | 97 |
| 4.2.3 Cenário 3 – Minimização dos Prejuízos | 98 |
| 5 CONCLUSÃO | 102 |
| 5.1 TRABALHOS FUTUROS | 105 |
| REFERÊNCIAS | 106 |
| APÊNDICE A | 113 |

1 INTRODUÇÃO

O abastecimento de energia é um dos principais tópicos de discussão política e de pesquisa científica na atualidade (SAMORA *et al.*, 2016). Possibilitar o crescimento econômico conciliado à redução da emissão de gases no suprimento de energia elétrica é um grande desafio para as economias emergentes (PRADO *et al.*, 2016). Assim, a necessidade de produção de energia limpa se intensifica, com a principal finalidade de cumprir acordos internacionais de despoluição e nas reduções do efeito estufa e do aquecimento global.

Prado *et al.* (2016) estimam que até 2030 a demanda global por energia representará um aumento de consumo médio anual da ordem de 2,7%. Romanelli *et al.* (2018) apresentam dados recentes sobre o destaque da produção de energia no mundo, em que 20% da energia global provém de fontes renováveis, sendo que 80% deste volume é servido por usinas hidrelétricas, o que denota grande importância da fonte hídrica na implementação de estratégias econômicas de desenvolvimento.

O Brasil tem amplo destaque na produção de energia limpa. De acordo com dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2019b), 82% da energia produzida provém de fontes renováveis, sendo que a fonte hídrica representa quase 65% da capacidade instalada, sendo as Grandes Usinas Hidrelétricas (UHE) detentoras de aproximadamente 60% deste montante. No contexto de energia hidrelétrica, também se destacam os modelos de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e Centrais de Geração Hidrelétrica (CGH). De acordo com os autores Özcan, Ünlüsoy e Eren (2017), em função de inúmeros benefícios ambientais, sociais e econômicos, PCHs e CGHs são alternativas confiáveis e eficientes.

Ainda no Brasil, PCHs e CGHs são diferenciadas pela faixa de produção de energia: PCHs são caracterizadas pela produção de 5.000kW a 30.000kW, atribuído ainda o fato de o reservatório possuir área menor do que 13 km²; enquanto as CGHs têm capacidade de até 5.000 kW (BRASIL, 2016). Os requisitos e procedimentos para a obtenção de outorga de autorização para exploração de PCHs são dados pela Resolução Normativa nº 673, de 4 de agosto de 2015 (ANEEL, 2015). Já as CGHs estão dispensadas de concessão, permissão ou autorização, devendo apenas haver a comunicação ao poder concedente, conforme Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995 (BRASIL, 2015).

A participação de PCHs e CGHs na matriz de energia elétrica nacional é de 3,6%, segundo dados compartilhados pela ANEEL (2019a). No entanto, o número de empreendimentos deste porte em construção e o considerável potencial a ser explorado por meio dos inventários já realizados e projetos em estudo, revelam a importância do tema, sobretudo no aumento da oferta de energia elétrica. Logo, as usinas hidrelétricas de pequeno porte podem ser consideradas como relevantes e vantajosos projetos de investimento, quando viabilizados, técnica e economicamente, os potenciais hidrelétricos disponíveis.

De acordo com a regulamentação da ANEEL (2017a), um empreendimento de PCH nasce com o estudo de inventário hidrelétrico apresentado pelo empreendedor, que tem como objetivo a definição do aproveitamento ótimo dos rios. Depois de aprovado, o empreendedor pode elaborar o projeto básico (PB). O PB engloba o *layout* geral da obra, elencando as estruturas principais estimadas e equipamentos previstos, como turbina e gerador. É durante a elaboração do PB que se realiza a pré-seleção da turbina. Aprovado o PB, a próxima etapa consiste no projeto executivo (PE) e execução propriamente dita, com as devidas licenças ambientais emitidas paralelamente à evolução do processo de projeto.

A turbina hidráulica é especialmente responsável pelo sucesso do projeto. Por meio desta máquina é que se converte a energia potencial disponível em energia mecânica, necessária ao acionamento do gerador para a geração de energia elétrica (KUMAR e SINGAL, 2015a). Zhou *et al.* (2014) consideram que a escolha do tipo de turbina é um atividade tecnológica importante e fundamental no projeto de engenharia de uma usina hidrelétrica, principalmente para se obter índices de economia de energia, operação estável e confiável da usina.

De toda forma, selecionar o tipo de turbina, na fase de pré-projeto, não é uma atividade trivial, haja vista os diversos fatores concorrentes, que por vezes interferem na escolha do modelo a ser instalado, baseada no conhecimento tácito de projetistas, aliado às formulações tradicionais de cálculo de turbinas. Com isso, surge a indagação: como pré-selecionar os melhores modelos de turbinas que satisfaçam os interesses dos *stakeholders*, quando os dados técnicos de projeto indicam conflito na seleção entre as configurações disponíveis?

1.1 OBJETIVOS

Nessa subseção, apresentam-se o objetivo geral e os objetivos específicos que serão desenvolvidos no decorrer da pesquisa.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo de pré-seleção de turbinas hidráulicas por meio de uma abordagem multicritério, utilizando os métodos AHP e *Fuzzy-VIKOR*, para situações em que os dados técnicos de altura de queda e vazão, disponíveis para instalação do empreendimento, representem conflito na escolha das configurações existentes.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos, que sendo alcançados culminarão no Objetivo Geral deste estudo, são relacionados como: (i) apresentar critérios estruturados de seleção de turbinas hidráulicas na etapa de pré-seleção por meio de um método de pesquisa estruturado em consulta à literatura disponível; (ii) desenvolver um modelo para pré-seleção de turbinas hidráulicas se utilizando de novos critérios e de métodos multicritério existentes; (iii) aplicar o modelo de seleção desenvolvido para pré-seleção de turbina hidráulica; (iv) discutir os resultados obtidos pela aplicação do modelo de seleção desenvolvido, destacando as principais observações acerca do tema.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os aspectos físicos das usinas influenciam os tipos de máquinas utilizadas e as obras civis, interferindo nos custos e benefícios econômicos (FILHO; SANTOS; BARROS, 2017). De acordo com Santolin *et al.* (2011), uma usina precisa ser dimensionada considerando também o design da turbina e suas dimensões. A seleção da melhor turbina, dentre os diversos tipos existentes, para Jaliu *et al.* (2010), depende das características do local de instalação, como disponibilidade de

queda e vazão, em função da potência necessária. Williamson, Stark e Booker (2014) indicam que os tipos de turbina atendem a faixas específicas de altura de queda, vazão e rotação do eixo, buscando a adaptação à rotação síncrona do gerador.

Projetistas tendem a escolher a turbina que acreditam ser a melhor opção, com base na observação de critérios técnicos (como eficiência, por exemplo) e também na experiência individual. Porém, na prática, a opção estimada pode refletir em um maior custo ao equipamento e às demais estruturas que complementam a usina. Ogayar e Vidal (2009), apresentam equações à estimativa de custos dos equipamentos eletromecânicos, de acordo com o tipo de turbina, potência e altura de queda. No entanto, as estruturas civis não são consideradas. Singal, Saini e Raghuvanshi (2010) indicam os custos estimados para estruturas civis e equipamentos, em função da potência e altura de queda, sem considerar as variações por tipo de turbina.

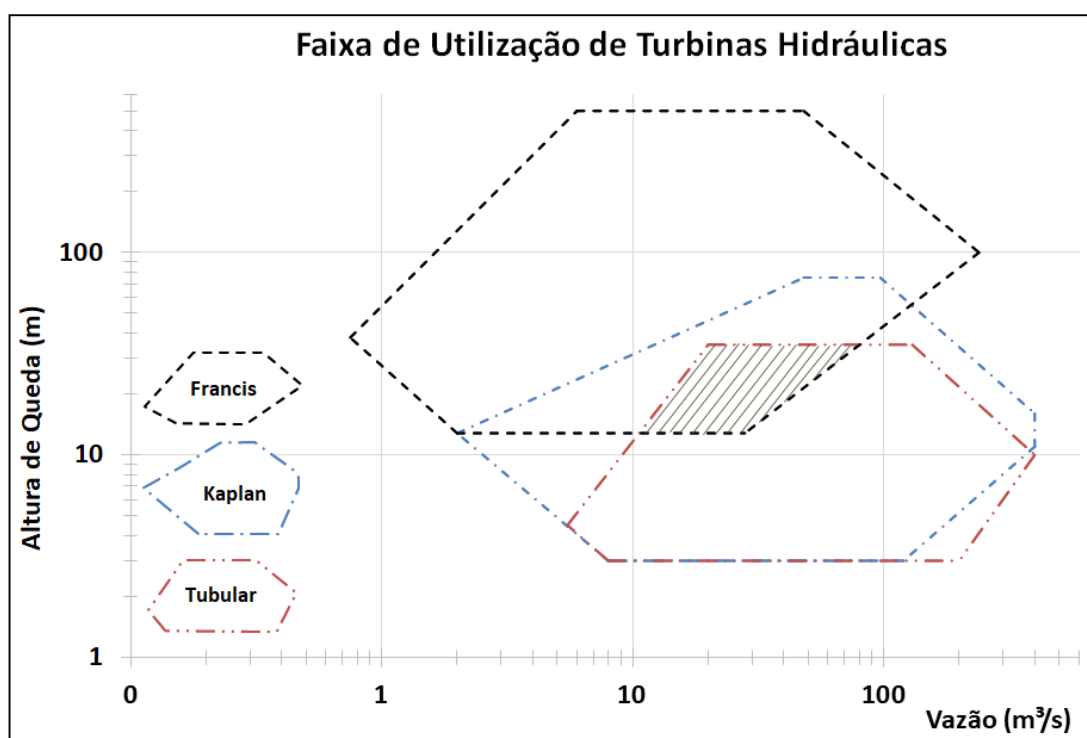
Para uma determinada faixa de queda e vazão (ver Seção 1.3), várias configurações de turbinas podem ser empregadas. Apesar das poucas referências bibliográficas disponíveis indicarem uma sequência de análise e cálculos para selecionar a melhor turbina, não está claro como proceder em situações cujo posicionamento esteja compreendido em uma zona de transição ou aplicação mútua dos tipos clássicos de turbinas de reação. Assim, o propósito desta dissertação é fornecer, por meio de um modelo multicritério, orientação à tomada de decisão na seleção prévia do tipo de turbina a ser implantada, buscando acelerar o processo de elaboração do PB.

Para que seja possível, no processo de tomada de decisão, considerar a capacidade cognitiva humana, ou seja, onde não é possível aplicar precisão no julgamento, variáveis linguísticas são utilizadas (NADABAN, DZITAC e DZITAC, 2016). As variáveis linguísticas são palavras ou sentenças em linguagem natural, segundo (Zimmermann, 2001), que ajudam a expressar o sentimento ou intenção do decisor. Em auxílio ao processo decisório, números *Fuzzy* são introduzidos (MARDANI, JUSOH e ZAVADSKAS, 2015). Neste caso, os conjuntos são formados por números *Fuzzy* triangulares (subseção 2.5).

1.3 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Nesta pesquisa são consideradas as aplicações de turbinas hidráulicas para as faixas de queda e vazão delimitados para 20 a 35 m e 10 a 30 m³/s, respectivamente. Neste intervalo, destacado pela área sombreada conforme Figura 1, é possível aplicar turbinas com rotor Francis e Kaplan e suas configurações (Francis Horizontal Simples, Francis Horizontal Dupla, Francis Vertical, Kaplan Vertical, Tubular S-Vertical, Tubular S-Montante e Tubular S-Jusante). Demais tipos de turbinas não são possíveis de utilização, pois compreendem alturas de queda diferentes, como o caso de turbinas Pelton (MACINTYRE, 1983).

Figura 1 - Pré-seleção de turbinas hidráulicas



Fonte: O autor, 2019.

Esta pesquisa é aplicada às pequenas usinas, classificadas como PCHs e CGHs, foco desta dissertação, cujas instalações apresentam maiores variações de arranjo em relação às UHEs. Ainda, a relação da máxima altura e máxima vazão do range estabelecido remete à potência gerada compreendida para PCH. A quantidade de turbinas para uma mesma usina não está sendo analisada nesta pesquisa.

1.4 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa desenvolvida nesta dissertação está alinhada com as orientações de Gil (2002), no que tange à classificação quanto à natureza, objetivos, métodos e procedimentos.

Quanto à sua natureza, a pesquisa é considerada como aplicada, uma vez que gera conhecimento para aplicação prática na resolução de problemas específicos (GIL, 2002). Neste caso, direcionada à construção de um modelo que auxilie na etapa da pré-seleção de turbinas hidráulicas a serem utilizadas por engenheiros de aplicação, projetistas e demais partes interessadas, durante os estudos de viabilidade do empreendimento hidroelétrico.

Sobre os objetivos, segundo Gil (2002), a pesquisa é tida como exploratória por proporcionar maior familiaridade com o problema e por envolver um levantamento bibliográfico na busca de informações adicionais sobre o assunto, em relação àquelas conhecidas do cotidiano, por meio da análise de exemplos que contribuam para o entendimento. Isso permitiu criar um embasamento técnico para a proposição do modelo de pré-seleção de turbinas hidráulicas.

Os métodos podem ser classificados em qualitativos e quantitativos em relação à forma de abordagem. O autor Cauchick Miguel (2002) explica que a abordagem qualitativa visa à coleta de dados sem se preocupar com o resultado numérico, enquanto a quantitativa está centrada na objetividade e prima por resultados quantificados, utilizando análise e tratamento de dados por técnicas estatísticas. Esta pesquisa combina as duas abordagens: utiliza o método qualitativo na fase da coleta de dados, para embasar teoricamente a construção do modelo por meio da seleção de critérios a serem utilizados na pesquisa/entrevista de preferências a ser respondida por especialistas; e o método quantitativo para aplicação do modelo, por meio de modelo multicritério de apoio à tomada de decisão.

Em relação aos procedimentos, combina-se à pesquisa bibliográfica os procedimentos teóricos (CAUCHICK MIGUEL, 2002), por meio do levantamento de referências teóricas publicadas em artigos científicos, aplicadas na etapa de determinação dos critérios; um estudo de múltiplos casos (aplicação generalista)

(GIL, 2002), e outro estudo de caso com aplicação direcionada a um projeto específico, que servirá como base de comparação ao modelo proposto.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos, a saber:

O Capítulo 1 aborda a temática desta dissertação, seus objetivos, justificativa, a delimitação de escopo da dissertação e a classificação da pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico, abordando assuntos relacionados à energia limpa, hidrelétricas, turbinas hidráulicas e métodos multicritério e suas aplicações no campo de energias renováveis, mais propriamente em centrais hidrelétricas.

O Capítulo 3 aborda a construção do modelo de pré-seleção de turbinas hidráulicas, assim como os procedimentos à coleta das informações necessárias ao modelo e os detalhes do estudo de caso para aplicação do modelo.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos na aplicação do modelo de pré-seleção de turbinas hidráulicas e os resultados obtidos com a execução do estudo de caso.

Por fim, o Capítulo 5 relata as principais conclusões sobre os resultados obtidos com a aplicação do modelo de pré-seleção de turbinas hidráulicas e a sugestão para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda os assuntos relacionados às pequenas hidrelétricas, ao método para pré-seleção de turbinas hidráulicas e à decisão multicritério. No que se refere às pequenas hidrelétricas, que englobam as PCHs e CGHs, são apresentados temas relacionados a aproveitamentos hidrelétricos, arranjos de construção, principais estruturas de uma usina hidrelétrica e turbinas hidráulicas. Quanto ao método para pré-seleção de turbinas, é exposto de forma detalhada o passo a passo para definição da turbina e suas características para construção. Em relação ao tema da decisão multicritério, é apresentado um histórico de aplicações no campo de energias renováveis, incluindo aquelas com utilização de conjuntos difusos.

2.1 PEQUENAS HIDRELÉTRICAS

Ao longo do tempo, PCHs e CGHs têm sido indicadas como ótimas alternativas à geração de energia elétrica e boas oportunidades enquanto projetos de investimento (MAKARON, 2012). Inúmeros benefícios são demonstrados por investidores em suas análises, como: baixos custos administrativos e executivos, pequeno impacto ambiental e uma possibilidade de previsão de produção (BORKOWSKI, 2015). Gono *et al.* (2013) relatam também: curto período de construção, pequenas áreas de implantação, sistemas operacionais com baixo custo de operação e manutenção, são livres de resíduos e altamente seguros.

Em função dessas vantagens, o número de empreendimentos construídos nos últimos anos tem alcançado um patamar expressivo no cenário nacional com importante incremento de potência à matriz energética brasileira, gerando emprego e renda à população circunvizinha. Nos municípios sítios das pequenas usinas, é sentido um aumento dos indicadores sociais, como o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), por exemplo, em função de investimento dos tributos arrecadados na comercialização de energia elétrica (ABRAPCH, 2016).

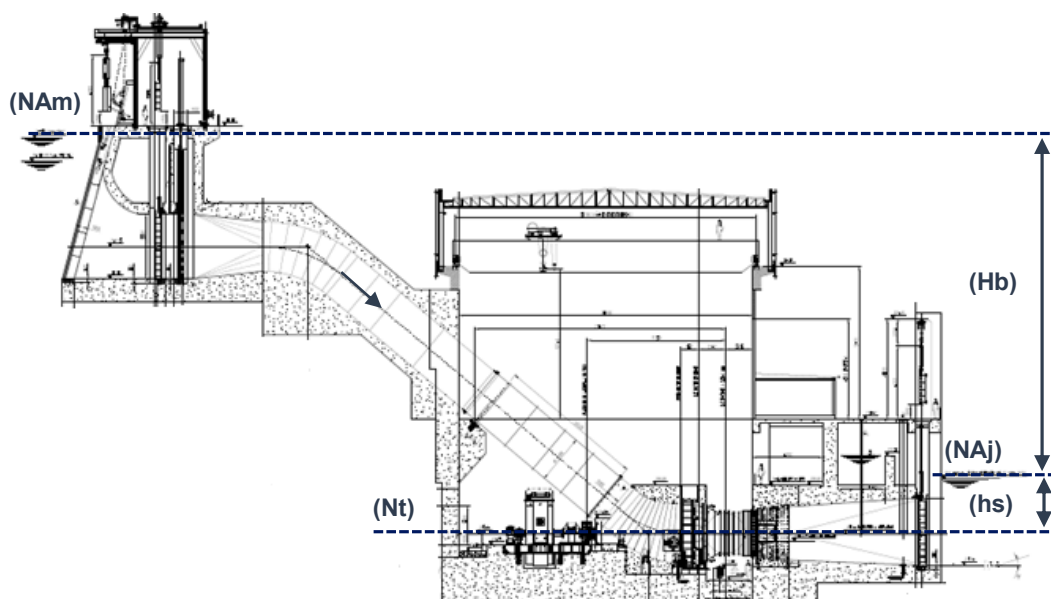
Em termos de potencial de instalação, a ANEEL, através de sua publicação *Resumo Geral de Novos Empreendimentos de Geração* (ANEEL, 2017b), demonstra que até o ano 2023 devem entrar em operação 1308 MW provenientes de empreendimentos como PCHs. Outros 632 MW são monitorados, porém sem

previsão para entrada em operação, por enfrentarem graves restrições e demandarem estudos mais complexos de viabilização (ANEEL, 2017b).

2.1.1 Aproveitamento Hidrelétrico

O aproveitamento hidrelétrico ou potencial hidrelétrico consiste na utilização dos benefícios da geografia de um determinado local ou região, dada diferença positiva entre cotas de elevação e vazão do afluente existente, resultando na capacidade de produção de energia elétrica. O esquema básico de aproveitamento hidrelétrico é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Arranjo esquemático de aproveitamento hidrelétrico – Tipo Central de Represamento.



Fonte: O autor, 2019.

A potência máxima bruta de um aproveitamento hidrelétrico é dada basicamente em função da altura de queda bruta (H_b) e vazão de água, conforme indicado em (1). A formulação apresentada na equação (1) é uma simplificação de Simone (2000) e condiz às aplicações práticas. As deduções matemáticas das equações para condução de fluidos incompressíveis, como o Teorema de Bernoulli, podem ser consultadas em Fox, McDonald e Pritchard (2006).

$$P_{(W)} = \rho_{(kg/m^3)} \times g_{(m/s^2)} \times Q_{(m^3/s)} \times H_{b(m)} \quad (1)$$

Em que H_b é a altura topográfica dada pela diferença entre dois níveis topográficos – Nível de Água de montante (NA_m) e Nível de Água de jusante (NA_j) – também conhecida como queda bruta; Q é a vazão disponível, normalmente adotada como Q_{95} , ou seja, a vazão presente em 95% do tempo do ano hidrológico, considerando as séries históricas de vazões, advindo da curva de permanência de vazões do afluente; g , a aceleração gravitacional local; e ρ a densidade do fluido.

No entanto, a condução de um fluido por condutos e demais estruturas gera perdas (J) por atrito durante o escoamento, impactando na altura H_b disponível, fazendo com que a energia cinética disponível seja menor, admitindo, portanto, o valor de queda líquida (H) apresentado na equação (2), que deve ser o valor utilizado para o cálculo da energia (P) a ser entregue à turbina, fornecido pela equação (3).

$$H_{(m)} = NA_{m(msnm)} - NA_{j(msnm)} - J_{(m)} \quad (2)$$

$$P_{(W)} = \rho_{(kg/m^3)} \times g_{(m/s^2)} \times Q_{(m^3/s)} \times H_{(m)} \quad (3)$$

Uma ressalva importante é dada para a equação (2): a relação entre NA_m e NA_j é válida para turbinas de reação (Francis e Kaplan). Já nas turbinas de ação (Pelton), o NA_j deve ser substituído por N_t (Nível da turbina), que corresponde à cota de elevação de instalação do eixo da turbina, para máquinas horizontais com dois injetores, ou centro do rotor, para máquinas com instalação vertical. Esta correção se faz necessária na medida em que as turbinas de ação não possuem tubo de aspiração e, deste modo, não haveria recuperação de energia cinética em potencial.

A potência disponibilizada pela turbina considera as perdas internas de funcionamento (perdas hidráulicas + perdas volumétricas) e perdas mecânicas, como a dissipação de potência pelos mancais (em caso de a turbina possuir mancais). Normalmente, as turbinas têm tido eficiência (η_t) da ordem de 91% a 94%. Assim, a potência gerada no eixo da turbina para o gerador é dada conforme a equação (4).

$$P_{(W)} = \rho_{(kg/m^3)} \times g_{(m/s^2)} \times Q_{(m^3/s)} \times H_{(m)} \times \eta_t \quad (4)$$

Assim como a turbina, o gerador também possui perdas quando em funcionamento. Nesse caso, perdas mecânicas e elétricas, o que acaba por disponibilizar a potência final gerada pelo empreendimento. A eficiência de funcionamento de um gerador trifásico (η_g) é comumente estimado entre 95% a 97%, e a potência gerada definida pela equação (5).

$$P_{(W)} = \rho_{(kg/m^3)} \times g_{(m/s^2)} \times Q_{(m^3/s)} \times H_{(m)} \times \eta_t \times \eta_g \quad (5)$$

Em termos de simplificação da equação, associa-se o produto $\eta_t \times \eta_g$ como η_T , que corresponde a eficiência global, e reescreve-se a equação (5) para se obter a equação (6).

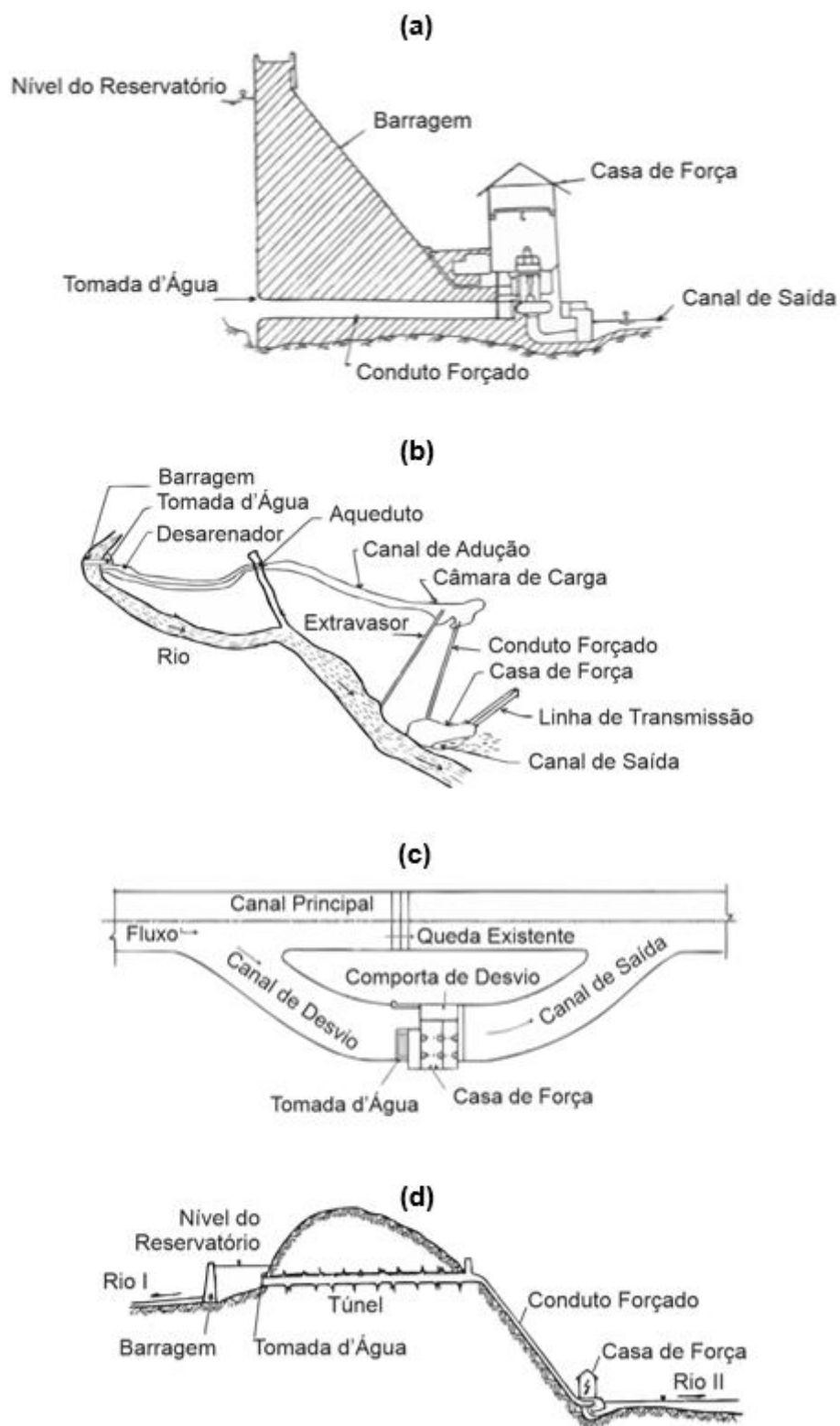
$$P_{(W)} = \rho_{(kg/m^3)} \times g_{(m/s^2)} \times Q_{(m^3/s)} \times H_{(m)} \times \eta_T \quad (6)$$

Nota-se, portanto, que a potência final gerada é afetada pelas perdas energéticas, hidráulicas e mecânicas decorrentes das estruturas da usina e dos equipamentos empregados, o que faz com que as medidas de minimização de tais perdas resultem em um maior potencial de energia elétrica a ser gerada.

2.1.2 Arranjos Construtivos de Pequenas Usinas Hidrelétricas

Notadamente, a depender das condições geográficas do local de instalação da pequena hidrelétrica, um projeto em particular deverá ser considerado. No entanto, as variáveis dispostas devem enquadrar o *layout* da usina para um dos quatro casos preferenciais, indicados por Filho *et al.* (2017), dispostos na Figura 3.

Figura 3 - Esquemas de Construção de Usinas Hidrelétricas: (a) Central de Represamento; (b) Usinas Hidrelétricas a Fio d'Água; (c) Usinas de Desvio; (d) Usinas de Derivação



Fonte: Adaptação de FILHO; SANTOS e BARROS (2017).

Usinas com Barragem (Figura 3a): este tipo de arranjo tem casa de força constituída ao pé de uma barragem, geralmente de altura maior que as centrais de desvio. Normalmente, caracterizam-se por serem aproveitamentos de baixa queda, proporcionada, exclusivamente, pela altura da barragem.

Usinas Hidrelétricas a Fio D'Água (Figura 3b): este tipo de arranjo tem a casa de força afastada da barragem, sendo esta ligação feita por meio de um circuito hidráulico composto por um canal de adução ou conduto de baixa pressão e câmara de carga. Em algumas situações, necessita de túnel e/ou chaminé de equilíbrio e conduto de alta pressão.

Usinas em Canais (Figura 3c): este *layout* compreende a construção de um canal de desvio à instalação da Barragem, Vertedouro e Casa de Força, sem interferir nas características geográficas do afluente.

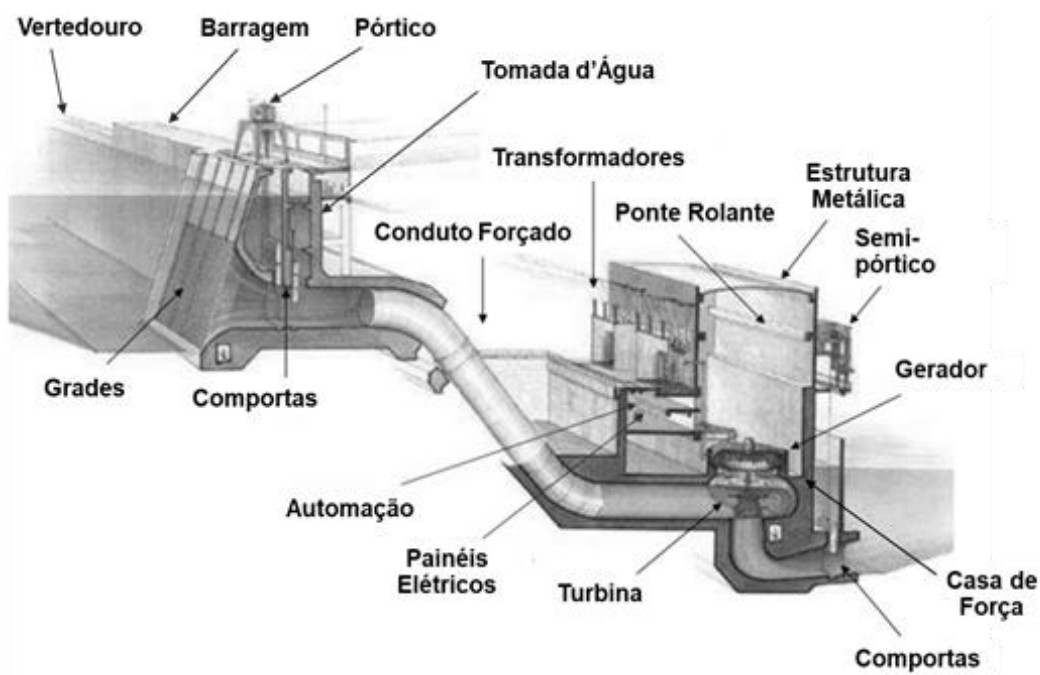
Usinas de Derivação (Figura 3d): central em que se desvia a água do rio que é conduzida por meio de tubulações ou túneis até a chaminé de equilíbrio e daí por meio de tubulações até as turbinas onde a água é restituída a um rio diferente do qual foi aduzida.

2.1.3 Principais Estruturas de uma Pequena Usina Hidrelétrica

O processo de produção de energia hidrelétrica depende diretamente das disponibilidades de queda, vazão, *layout* do circuito de geração e desempenho dos equipamentos turbina e gerador. No entanto, para que seja possível oferecer segurança à planta, suportar as manobras de operação e possibilitar manutenção e reparo dos equipamentos principais e do imóvel, outras estruturas e componentes se fazem necessários e são responsáveis indiretos pela geração.

De modo geral, a estrutura de uma usina com barragem pode ser verificada na Figura 4. Nesta, são demonstradas Barragem, Vertedouro, circuito hidráulico (Tomada d'Água e Conduto Forçado), equipamentos hidromecânicos (comportas e grade), Casa de Força e a estrutura metálica de sustentação (da cobertura e da Ponte Rolante), equipamentos de levantamento (Ponte Rolante, Pórtico e Semi-pórtico), Transformador e sistemas auxiliares (como Painéis Elétricos e Automação), além dos equipamentos principais: Turbina e Gerador.

Figura 4 - Estrutura de usina hidrelétrica com barragem



Fonte: Adaptação de IESA - Inepar, 2018.

Representação similar é apresentada por Trailli (2018), que convencionou a contemplação de uma usina hidrelétrica sob ótica de duas estruturas preferenciais: Estruturas Civis, que compreendem as obras civis completas de casa de força, tomada d'água, canal de fuga e conduto forçado (nesta estrutura estão inseridos os devidos equipamentos hidromecânicos associados, como comportas de controle, por exemplo); e os equipamentos eletromecânicos, compostos por turbinas hidráulicas, geradores, sistemas auxiliares mecânicos (SAM) e elétricos (SAE), transformadores e painéis de controle. Um esquema básico de hierarquia, considerando as principais estruturas, é apresentado por Singal (2009).

2.1.4 Etapas de Implantação de Pequenas Usinas Hidrelétricas

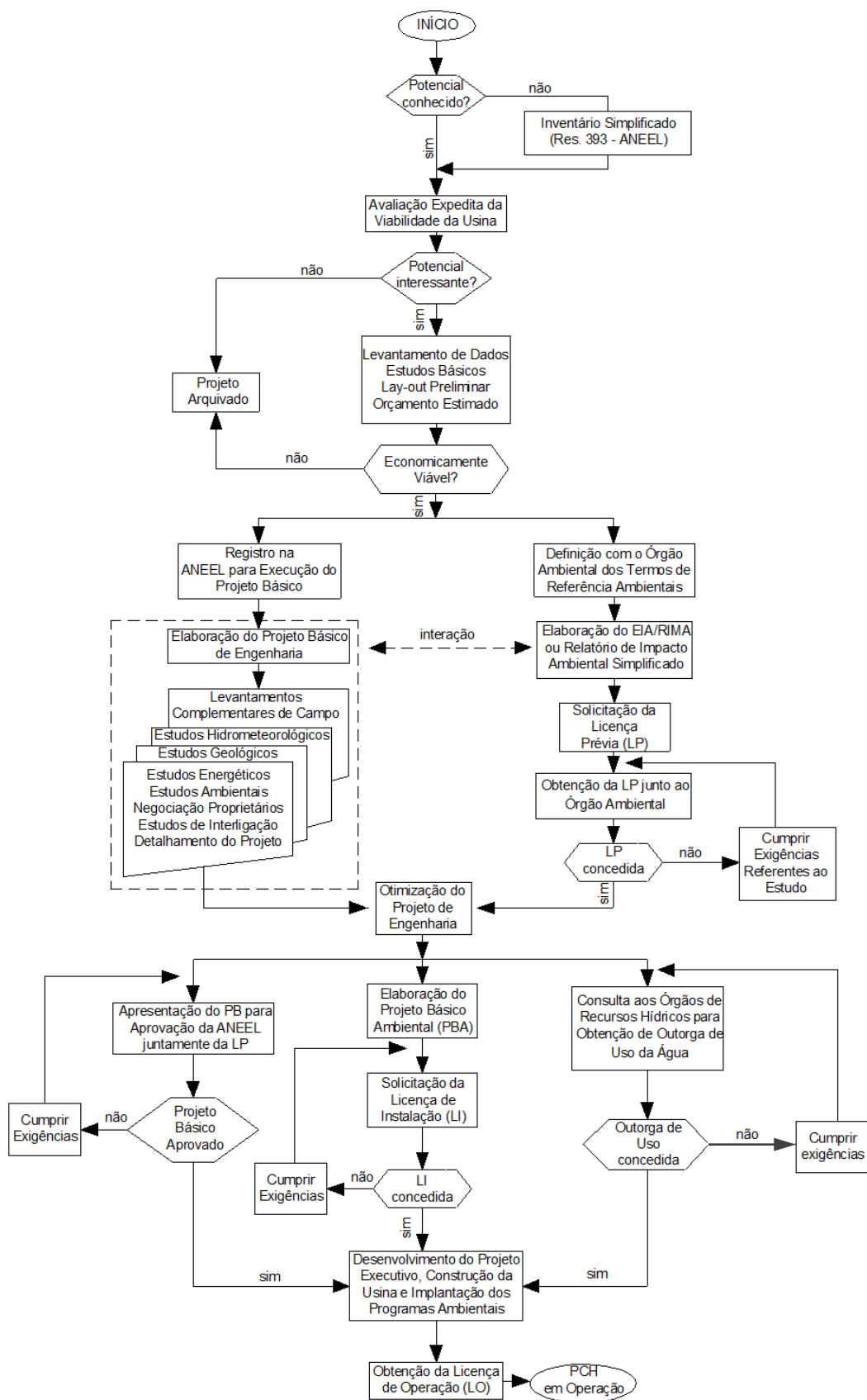
De acordo com o *Manual de Inventário Hidrelétrico de Bacias Hidrográficas do Ministério de Minas e Energia* (MME, 2007), que pode ser admitido para usinas de pequeno porte, o ciclo de estudos e implantação de uma usina hidrelétrica compreende cinco etapas sequenciais:

- **Etapa 1** – Estimativa do Potencial Hidrelétrico: Na etapa inicial se procede a análise preliminar das características da bacia hidrográfica, quanto aos aspectos hidrológicos, topográficos, entre outros, e possibilidade de geração de energia.
- **Etapa 2** – Inventário Hidrelétrico: Neste estágio, estudos mais detalhados em relação às várias alternativas de divisão de queda de uma bacia hidrográfica são realizados. O inventário passa a compor o plano de expansão energética do país.
- **Etapa 3** – Viabilidade: Nesta etapa, estudos mais aprofundados, para análise da viabilidade técnica, energética, econômica e socioambiental são efetuados. Previamente são definidas as obras de infraestrutura necessárias à construção do empreendimento, estruturas macros da usina e pré-seleção de equipamentos, de modo a possibilitar a obtenção da licença prévia (LP).
- **Etapa 4** – Projeto Básico: Para elaboração do Projeto Básico, necessário à obtenção da licença de instalação (LI), o estudo de viabilidade realizado na etapa anterior é detalhado de modo a definir, com maior precisão, as características técnicas do projeto, as especificações técnicas das obras civis e equipamentos eletromecânicos.
- **Etapa 5** – Projeto Executivo: Como etapa final, o Projeto Executivo contempla a elaboração dos desenhos dos detalhamentos das obras civis e dos equipamentos eletromecânico necessários à execução da obra e à montagem e testes dos equipamentos. Por fim, é expedida a licença de operação (LO), estando o empreendimento apto à geração comercial de energia elétrica.

De forma mais detalhada, a Eletrobrás - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. apresenta, no manual *Diretrizes para Estudos de Pequenas Centrais Hidrelétricas* (ELETROBRÁS, 2000), um fluxograma de processos detalhado para implantação de projetos de pequenas usinas, que engloba desde o inventário hidrelétrico até a obtenção da licença de operação (LO) (ver Figura 5). De forma análoga, a norma IEC 61116:1992 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1992) indica um fluxograma similar, o que sugere a conformidade às práticas internacionais.

Etapas semelhantes são feitas pela empresa de consultoria *Fichtner Management Consulting AG* no manual *Hydroelectric Power – A Guide for Developers and Investors* (2012), patrocinado pela *Internacional Finance Corporation*, associada ao Banco Mundial. No guia são mostradas as etapas de implementação de um projeto de usina hidrelétrica. As etapas 2 e 3 são concentradas para os estudos de pré-viabilidade e viabilidade do projeto, que são realizados para confirmar a atratividade do local, desenvolver um projeto preliminar da planta e estimar as necessidades de investimento.

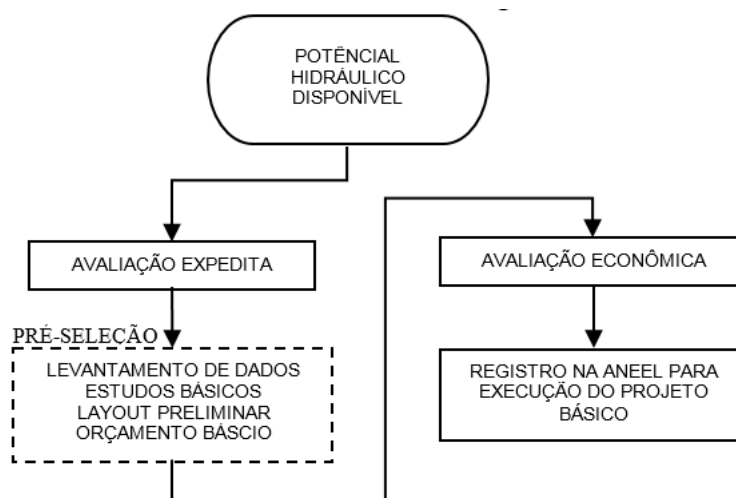
Figura 5 - Fluxograma de instalação de pequenas usinas



Fonte: Adaptação de Eletrobrás, 2000.

Para melhor compreender o posicionamento desta dissertação, toma-se como referência o fluxograma de processos (Figura 5), proposto pela Eletrobrás. O passo a passo adaptado é transcrito na Figura 6, que engloba desde a identificação do potencial hidráulico disponível, até o registro do PB no órgão competente, destacando o posicionamento da pré-seleção de turbinas, atividade fundamental na análise de pré-viabilidade de projetos hidrelétricos de pequeno porte.

Figura 6 - Etapa inicial de implantação de uma pequena usina



Fonte: O autor, a partir de Eletrobrás, 2000.

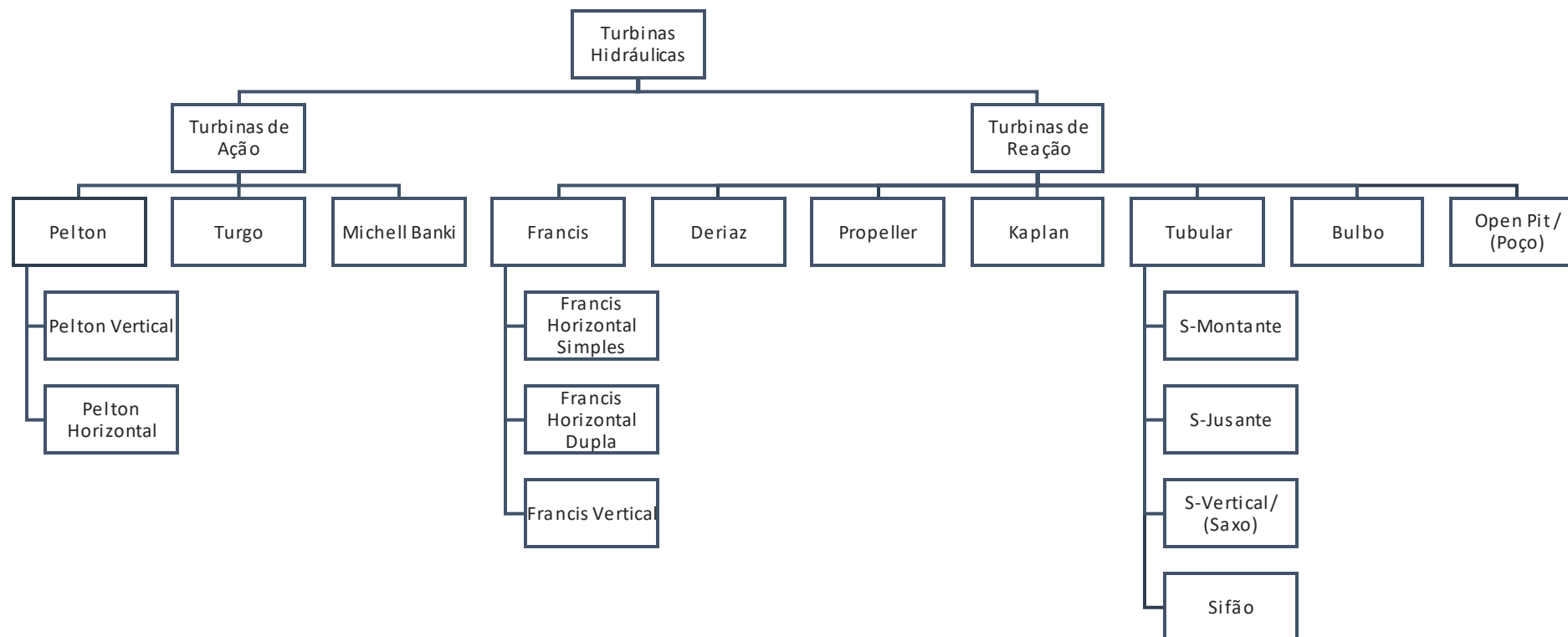
Singal (2009) apresenta um fluxo de etapas envolvidas na decisão de construção ou não construção do empreendimento, no que o autor intitula de *Formulação e Planejamento de Projetos*. O mesmo autor destaca que todas as investigações, coleta de dados, formulação de projetos, estudo de viabilidade e preparação de relatórios são necessários na fase de pré-construção, sendo que os principais dados são derivados dos estudos de topografia, hidrologia, geologia e materiais.

2.2 TURBINAS HIDRÁULICAS

Desde os tempos mais remotos, o homem utiliza a energia presente na água em auxílio às suas necessidades de trabalho. Os primeiros registros, segundo Igual (1921), remetem à utilização da roda d'água para moagem de cereais. As turbinas hidráulicas podem ser comparadas às rodas d'água no que tange ao aproveitamento

da energia de corrente de um fluido para conversão em energia mecânica. Conceitualmente, turbinas hidráulicas são máquinas de fluxo, do tipo motriz, que convertem a energia potencial da água em energia cinética, utilizando a diferença de elevação entre dois níveis (KOVALEV, 1965). Podem ser divididas em dois grandes grupos, identificados como turbinas de ação e turbinas de reação, cuja classificação de modelos e variações de construção é indicada na Figura 7, a partir de ABNT NBR 6445:2016 (Associação Brasileira De Normas Técnicas, 2016), Kumar e Singal (2015a), Elbatran *et al.* (2015a), Kaunda, Kimambo e Nielsen (2014), Williamson, Stark e Booker (2014) e Gale e Höfler (2010).

Figura 7 - Classificação das Turbinas Hidráulicas



Fonte: Adaptação de Kumar e Singal, 2015a.

Nas turbinas de ação, também identificadas como turbinas de impulso, o rotor é acionado por meio da incidência tangencial de um jato livre de água de alta velocidade nas pás do rotor (SANGAL, GARG E KUMAR, 2013; HENN, 2006). Neste tipo de turbina, tipicamente, o duto condutor está conectado ao diretor e, portanto, toda a energia de pressão da água é transformada em energia cinética apenas pelo diretor, sem ocorrer variação de pressão de fluido que passa pelo rotor (KUMAR e SINGAL, 2015a).

As turbinas de reação, por sua vez, promovem a redução da pressão do fluido durante a passagem pelo rotor, transformando a energia potencial em energia cinética e, na sequência, após passagem pelo rotor e já no tubo de sucção, promovem certa recuperação de energia cinética em energia potencial, aumentando, assim, a energia líquida disponível na transformação.

De acordo com o trabalho de Trailli (2018), os tipos de turbinas hidráulicas mais comuns no Brasil são as turbinas Francis, Kaplan e Pelton, com suas devidas variações de montagem. As turbinas de ação, no entanto, não serão abordadas nesta dissertação.

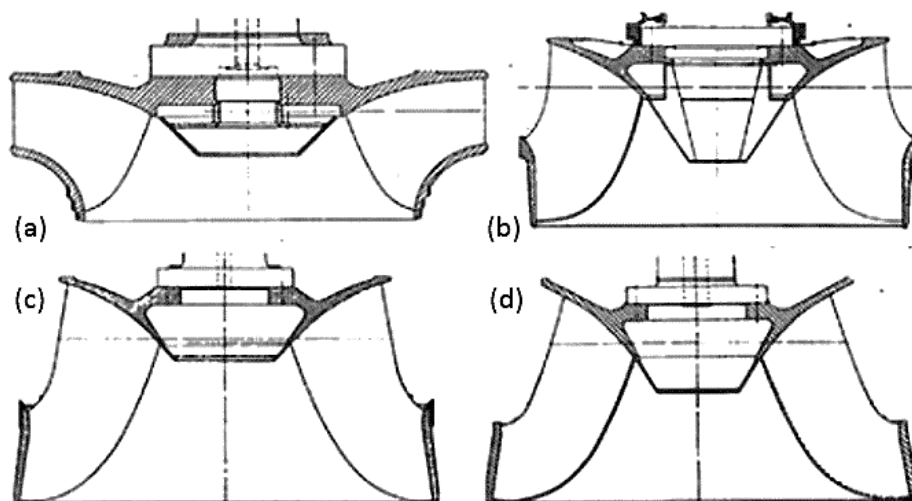
Na sequência, apresentam-se alguns termos técnicos relativos às turbinas hidráulicas a serem utilizados ao longo do capítulo. O termo h_s remete à altura de sucção, também conhecido como termo “afogamento” e corresponde à distância medida entre a cota topográfica (msnm) de instalação da turbina, coincidente à linha de centro do rotor, e a cota topográfica (msnm) de jusante para a condição de uma turbina quando em operação à plena carga. Quando essa diferença é negativa, indica-se que a turbina está “afogada”, ou seja, o rotor está instalado em uma cota inferior ao nível de jusante ou canal de fuga. Quando este valor é positivo, a turbina tem instalação em sucção “positiva”, ou seja, “não afogada”. O n_s é a velocidade específica da turbina baseada na potência, e o n_q , também é conhecido como velocidade específica da turbina, porém, baseado na vazão. Ambos são correspondente a um número característico operativo (ver seção 2.3).

2.2.1 Turbinas Francis

Inventada por Samuel Downm (1804-1879), em 1838, e melhorada em 1847 pelo inglês James Bicheno Francis (1815-1892), daí o nome Francis, esta máquina de reação tem sua classificação segundo o posicionamento de seu eixo, que pode

ser horizontal ou vertical, e uma grandeza denominada velocidade específica, que define a forma do rotor entre turbinas classificadas como (a) lentas, (b) normais, (c) rápidas e (d) ultrarrápidas (MACINTYRE, 1983). A Figura 8 apresenta essas diferentes formas características de rotores Francis.

Figura 8 - Forma dos Rotores Francis

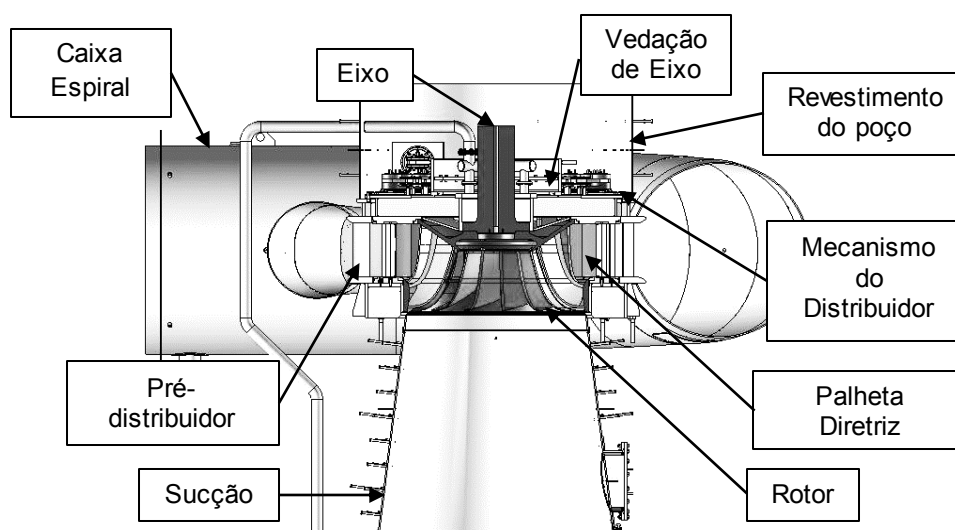


Fonte: Mira, 2015.

Em seu funcionamento, a água que adentra na caixa espiral tem sua direção orientada pelas palhetas fixas, dispostas no pré-distribuidor e, posteriormente, pelas palhetas diretrizes que, por serem móveis, controlam o fluxo conforme a carga necessária. Ao passar pelas palhetas móveis, o fluido é direcionado contra as pás do rotor que, onde ocorre a transformação de energia, de energia potencial em energia mecânica. Depois de fluir entre o rotor, a água é conduzida pelo tubo de sucção (difusor) até o canal de fuga onde terá como destino o leito do rio. Muitas vezes a água pode ser lançada diretamente do tubo de sucção ao rio.

A configuração das partes de uma turbina Francis pode ser verificada na Figura 9, representando uma seção de corte transversal da turbina Francis Vertical (FV).

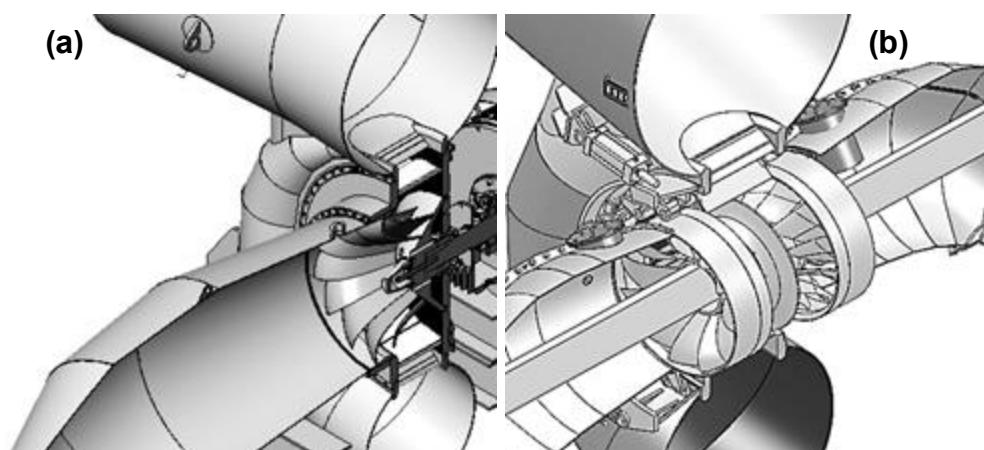
Figura 9 - Partes de uma Turbina Francis



Fonte: O autor, 2019.

Os componentes mecânicos e suas disposições praticamente não se alteram quando comparados os arranjos de montagem FV e Francis Horizontal Simple – FHS (Figura 10a). Apenas para o modelo Francis Horizontal Dupla – FHD (Figura 10b), além do rotor ser apresentado em corpo duplo, também é duplicado o conjunto tubo de sucção, além do eixo de acionamento ser transpassado lado a lado nesta turbina

Figura 10 - Conjunto turbina Francis com eixo horizontal: (a) FHS; (b) FHD

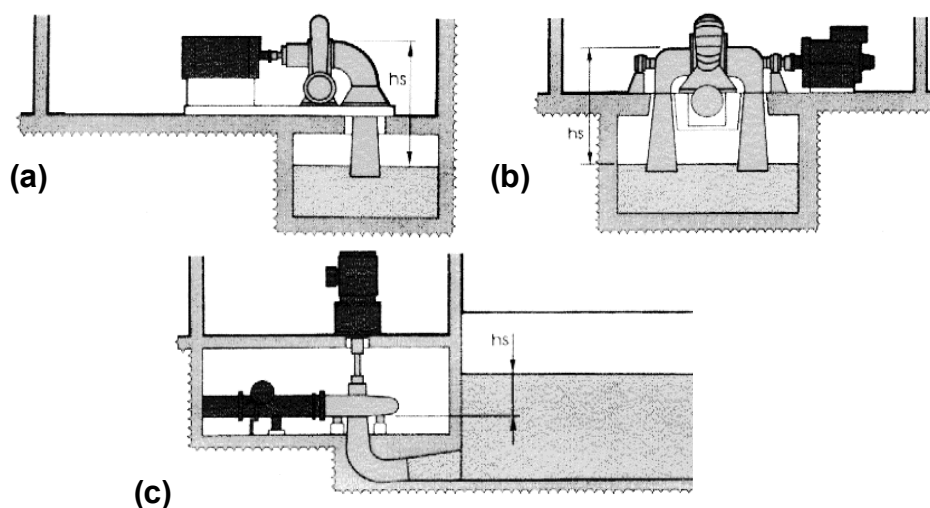


Fonte: O autor, 2019.

As turbinas Francis de eixo horizontal (FHS) estão presentes na maioria dos projetos das pequenas usinas, enquanto as turbinas de eixo vertical (FV) são empregadas em maior escala em projetos de alta potência. Basicamente, o que

diferença a aplicação de turbinas Francis horizontais e verticais está relacionado ao arranjo da Casa de Força e sua viabilidade de construção. A Figura 11 ilustra as configurações de montagem da turbina Francis.

Figura 11 - Turbinas Francis: (a) Francis Horizontal Simples; (b) Francis Horizontal Dupla; (c) Francis Vertical



Fonte: Alstom Brasil, 2008.

Como observado, as turbinas Francis com rotor duplo (FHD), por sua vez, somente permitem sua construção com eixo na posição horizontal, dada a disposição de seus dois difusores. As FHD têm a característica de operar sujeitas a maiores rotações, para uma mesma base de potência, quando comparadas às FHS, o que acaba por demandar um menor nível de afogamento ou ainda hs positivo, que contribui para uma menor escavação da Casa de Força.

2.2.2 Turbinas Kaplan

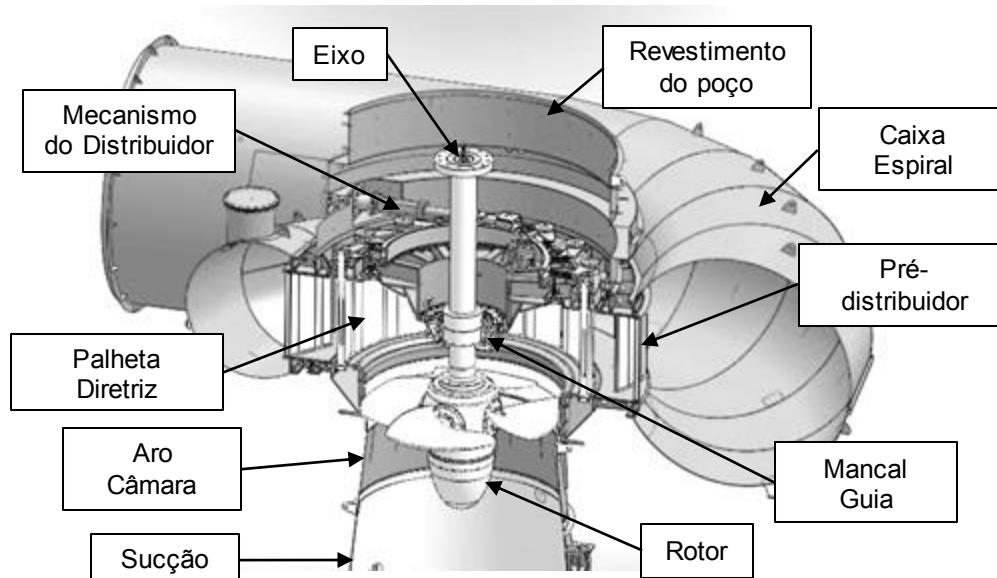
Idealizada pelo engenheiro Victor Kaplan (1876-1934), em 1912, a partir de estudos em observação às turbinas *Propeller*¹, adotou-se a possibilidade de variar, em tempo real, a posição das pás do rotor, o que originou um rotor de pás orientáveis. Um mecanismo interno permite variar o ângulo de inclinação das pás conforme descarga, sem variação sensível da eficiência (MACINTYRE, 1983). Isso

¹ As turbinas *Propeller* ou Hélices são assim designadas por possuírem rotor em forma de hélices de propulsão. Neste rotor, as pás são fixas em posição pré-definida.

se deve, principalmente, em função da variação de ângulo conjugado entre rotor e distribuidor, definido em projeto e aferido em testes dinâmicos de campo.

As turbinas com rotor Kaplan podem assumir diversas configurações de montagem, no entanto, sempre prezando por manter a premissa da possibilidade de conjugar os ângulos de posição das pás do rotor e palhetas do distribuidor. Tradicionalmente, a turbina Kaplan é conhecida pelo arranjo de eixo vertical (KV), cuja condução de água se dá por intermédio de um caracol. A Figura 12 identifica as partes de uma turbina Kaplan. Ao que se percebe, a turbina KV difere da turbina FV, principalmente em relação ao elemento rotor, já que são consonantes para disposição de caixa espiral, pré-distribuidor e distribuidor.

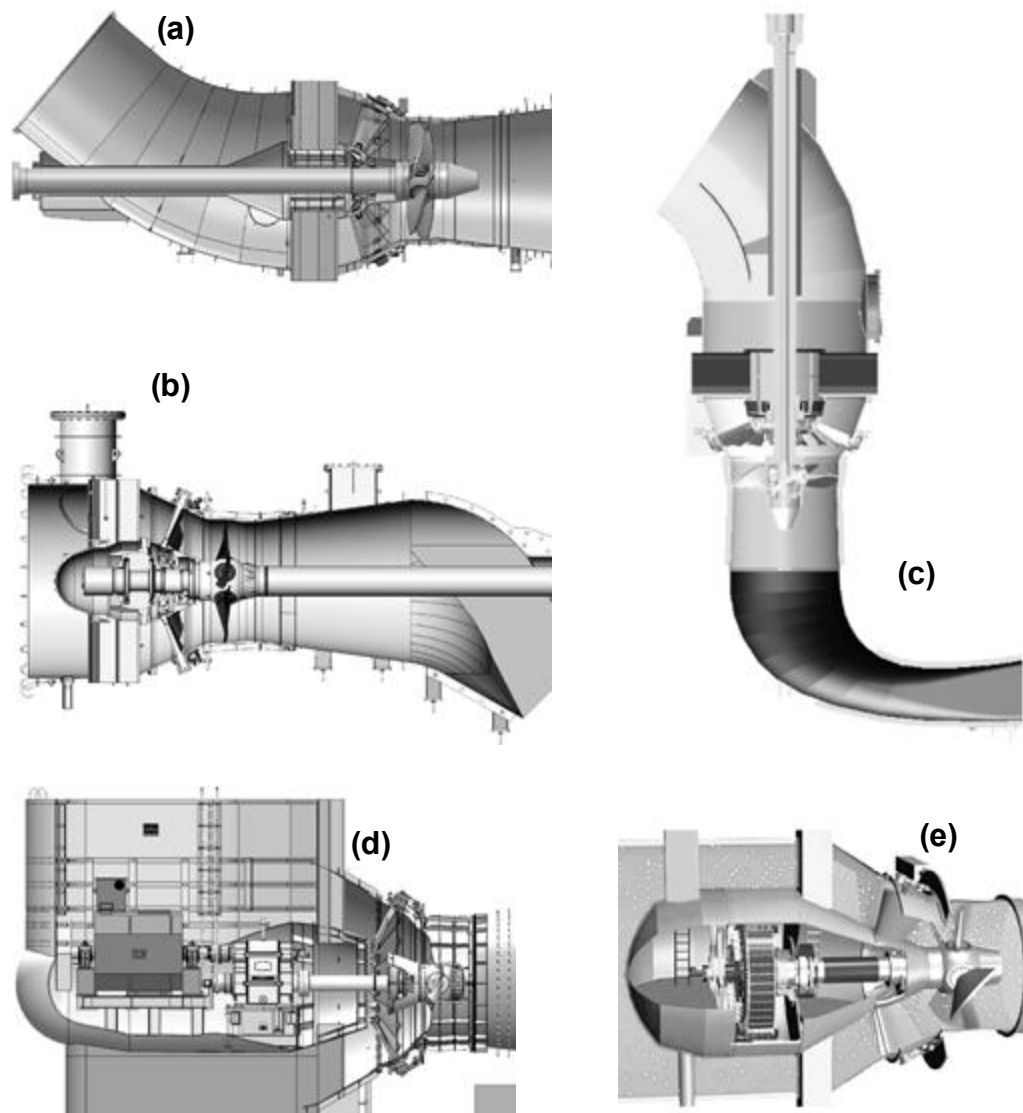
Figura 12 - Partes de uma turbina Kaplan Vertical



Fonte: O autor, 2019.

Os demais modelos de turbinas com rotor Kaplan apresentam, em geral, os mesmos componentes, com variação de geometrias segundo forma construtiva específica de cada modelo. A maior diferença apresentada quando comparados os modelos está na forma construtiva do pré-distribuidor, sendo substituído o caracol característico da turbina KV, para um tubo cilíndrico (tubular) instalado a montante do distribuidor nos modelos “S”, Poço ou *Open Pit* e Bulbo, apresentados na Figura 13.

Figura 13 - Modelos de turbinas tubulares: (a) Kaplan S-Montante; (b) Kaplan S-Jusante; (c) Kaplan S-Vertical; (d) Poço ou *Open Pit*; (e) Bulbo



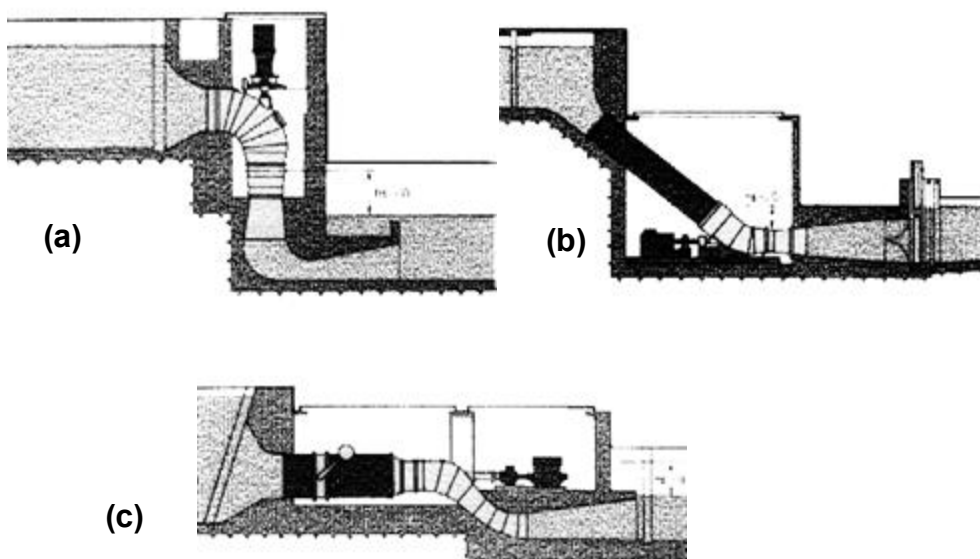
Fonte: (a); (b); (c); (d): O autor, 2019; (e): Bochi, (2018).

Ainda no sentido de se observar as principais diferenças entre modelos, o distribuidor tem alteração significativa (de cilíndrico para cônico), no entanto, também mantendo as funções do modelo KV. Quando observado o trecho de sucção, percebe-se que tanto na turbina Kaplan S-Jusante (KSJ), quanto na turbina Kaplan S-Vertical (KSV), também conhecida como turbina Saxo, há curvatura na saída, o que não ocorre na turbina Kaplan S-Montante (KSM). Em esclarecimento, KS é a identificação para turbina Kaplan “S” e M e J, para designação Montante e

Jusante, respectivamente, que refletem, obrigatoriamente, a posição de instalação do gerador a partir da posição do rotor da turbina, conforme ilustrado anteriormente.

Alguns *layouts* de instalação das turbinas tubulares com rotores Kaplan são demonstrados na Figura 14. Destaque para os *layouts* clássicos de KSV, KSM e KSJ.

Figura 14 - Turbinas Tubulares: (a) KSV; (b) KSM; (c) KSJ



Fonte: Alstom Brasil, 2008.

2.3 MÉTODO TRADICIONAL PARA PRÉ-SELEÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS

O tipo de turbina é dependente da relação queda-vazão (KOVALEV, 1965; BREKKE, 2001). Estas duas variáveis são naturalmente intrínsecas ao local de instalação da usina, sendo a variável queda mais sensível a influência pelas mãos do homem, através da possibilidade de represamento. Macintyre (1983) traz à tona uma terceira grandeza que afeta a seleção do tipo de turbina e está relacionada à rotação de acionamento do gerador, que é acionado pela turbina.

Macintyre (1983) relata em seu trabalho que nas décadas iniciais de invenções e projetos de turbinas, a forma de escolha do tipo de máquina era arbitrária e por tentativas. Com a evolução dos estudos e a experiência baseada em dados de turbinas instaladas, por meio da observação dos resultados, foi possível construir um modelo de seleção racional que possibilita prever, com maior exatidão,

o comportamento da unidade em funcionamento. Este modelo, no entanto, ainda não resolve o conflito entre modelos disponíveis para um intervalo de dados de aplicação.

Antes de discutir a seleção do tipo de turbina propriamente dita, é preciso entender os seguintes conceitos: turbinas geometricamente semelhantes; Turbina Unidade e Turbina Padrão

As turbinas geometricamente semelhantes são turbinas cujas dimensões se alteram simultânea e proporcionalmente, sem que sejam alteradas suas formas geométricas (SIMONE, 2000).

A Turbina Unidade é uma turbina hipotética, geometricamente semelhante a uma série ou família de turbinas, que, operando sob queda disponível de 1 m, fornece potência mecânica de 1 cv, considerando a maior eficiência e operando em condições análogas. A Turbina Unidade é a mesma para todas as turbinas geometricamente semelhantes e que constituem uma série/família de turbinas, e podem ser caracterizadas por grandezas comuns, sendo uma delas a velocidade específica baseada na potência (n_s) (SIMONE, 2000; MACINTYRE, 1983).

A velocidade específica baseada na potência (n_s) ou ainda número específico de rotações por minuto, é o número real de rotações por minuto da Turbina Unidade e qualificável (numericamente igual) às demais turbinas geometricamente semelhantes. Ou seja, todas as demais turbinas dessa série/família poderão ter outras potências e outras rotações de trabalho, mas terão a velocidade específica n_s definida pela Turbina Unidade (SIMONE, 2000; MACINTYRE, 1983). O cálculo de n_s , em rpm, por sua vez, considera a rotação de trabalho da turbina geometricamente semelhante (n) em rpm, a potência (P) em cv, e a altura de queda (H) em metros, conforme equação (7).

$$n_s = \frac{n\sqrt{P}}{H^4\sqrt{H}} \text{ (rpm)} \quad (7)$$

A Turbina Padrão é uma turbina também hipotética, que, sob uma queda de 1 m, funciona com uma vazão de 1 m³/s (MACINTYRE, 1983). Aqui, a grandeza admitida é velocidade específica baseada na vazão (n_q) ou ainda o número característico da descarga. O mesmo autor cita diversos outros autores que preferem adotar a Turbina Padrão como turbina de comparação, ao invés da Turbina

Unidade, sob a justificativa de que a Turbina Padrão considera a descarga (vazão) como grandeza conhecida, no lugar da potência, como ocorre com a Turbina Padrão, por esta considerar a eficiência como admitido.

Dentre os autores citados por Macintyre (1983), não há consenso quanto ao valor da vazão a ser considerado: se aquele relacionado ao ponto de maior eficiência ou o valor de vazão máxima em funcionamento, o que acaba por apresentar discrepâncias nos valores de n_q . Ainda, como não se tem por objetivo nesta dissertação mostrar as deduções matemáticas das equações, apresenta-se apenas a equação simplificada para o cálculo de n_q , a equação (8), que depende da vazão/descarga (Q) em m^3/s , além da rotação (n) em rpm, e da altura da queda (H) em metros.

$$n_q = \frac{n\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}} \text{ (adimensional)} \quad (8)$$

Assim, uma turbina a ser especificada pode ser classificada a partir de suas velocidades específicas (n_s) ou (n_q), calculados a partir das grandezas conhecidas: P, H, Q e n. O valor numérico resultante do cálculo poderá ser confrontado com os dados disponíveis no Quadro 1, apresentado por Macintyre (1983) e Raabe (1985) e organizado a partir de resultados obtidos com histórico de instalações.

Quadro 1 - Campo de aplicação dos diversos tipos de turbinas

| Tipos de Turbinas | | n_s (rpm) | n_q | H (m) |
|---|--------------|-------------|-------------|---------|
| Pelton | 1 jato | 18 | 5,3 | 800 |
| | 1 jato | 18-25 | 5,3-7,4 | 800-400 |
| | 1 jato | 26-35 | 7,7-10,4 | 400-100 |
| | 2 jatos | 26-35 | 7,7-10,4 | 800-400 |
| | 2 jatos | 36-50 | 10,7-14,9 | 400-100 |
| | 4 jatos | 40-50 | 11,9-14,9 | 400-100 |
| | 5 jatos | 51-71 | 15,1-21,0 | 500-200 |
| | 6 jatos | 72-90 | 21,4-26,8 | 400-100 |
| Francis | Muito Lenta | 55-70 | 16,4-20,8 | 600-200 |
| | Lenta | 71-120 | 21,1-35,7 | 200-100 |
| | Normal | 121-200 | 36,0-59,5 | 100-70 |
| | Rápida | 201-300 | 59,8-89,2 | 70-25 |
| | Ultra-rápida | 301-450 | 89,6-133,9 | 25-15 |
| Kaplan / Tubular / Bulbo / Propoller | 8 pás | 250-320 | 74,4-95,2 | 70-50 |
| | 7 pás | 321-430 | 95,5-128,0 | 50-40 |
| | 6 pás | 431-530 | 128,3-157,7 | 40-30 |
| | 5 pás | 534-620 | 158,0-184,5 | 30-20 |
| | 4 pás | 624-920 | 185-274 | 20-15 |
| | 3 pás | 920-1350 | 274-400 | 15-05 |

Fonte: Adaptação de Macintyre, 1983, e de Raabe, 1985.

A relação matemática entre n_s e n_q é fornecida pela equação (9).

$$n_q = \frac{n_s}{3,36} \quad (9)$$

Ainda em observação ao Quadro 1, há faixas de n_s e/ou n_q homólogas à aplicação de 2 tipos distintos de turbinas, como turbinas Pelton de 5 e 6 jatos e turbinas Francis, tidas como muito lenta e lenta, respectivamente. O mesmo vale para turbinas Francis rápidas e muito rápidas, em comparação às turbinas com rotor Kaplan de 8 até 4 pás. A definição do melhor tipo de turbina, segundo Macintyre (1983), é pertinente ao conhecimento das condições peculiares às instalações destas turbinas.

Macintyre (1983) afirma que, na teoria, não é impossível aplicar um tipo de turbina qualquer para todas as velocidades específicas, por exemplo. Porém, a prática em projetos e os resultados obtidos com as turbinas instaladas mostraram ao autor que cada um dos tipos examinados apresentou boa eficiência para valores de n_s compreendidos entre certos limites, o que sugere que um determinado tipo de turbina seja indicado preferencialmente para instalações caracterizadas pelos valores de H , Q e n . Assim, vários ábacos de seleção preliminar de turbinas foram construídos a partir das relações como $H \times n_q$ e $H \times n_s$.

É possível ainda, segundo Macintyre (1983), utilizar fórmulas empíricas para definir o n_s , a partir da informação do valor de queda (H) em metros, unicamente. O autor reforça que devido não haver precisão, o resultado do cálculo serve apenas como uma primeira estimativa, logo suficientes à pré-seleção de turbinas. As expressões para as turbinas Francis (equação (10)), turbina Kaplan (equação (11)) e *Propeller* (equação (12)) são apresentadas a seguir:

$$n_s = \frac{2300}{\sqrt{H}} \quad (10)$$

$$n_s = \frac{3100}{\sqrt{H}} \quad (11)$$

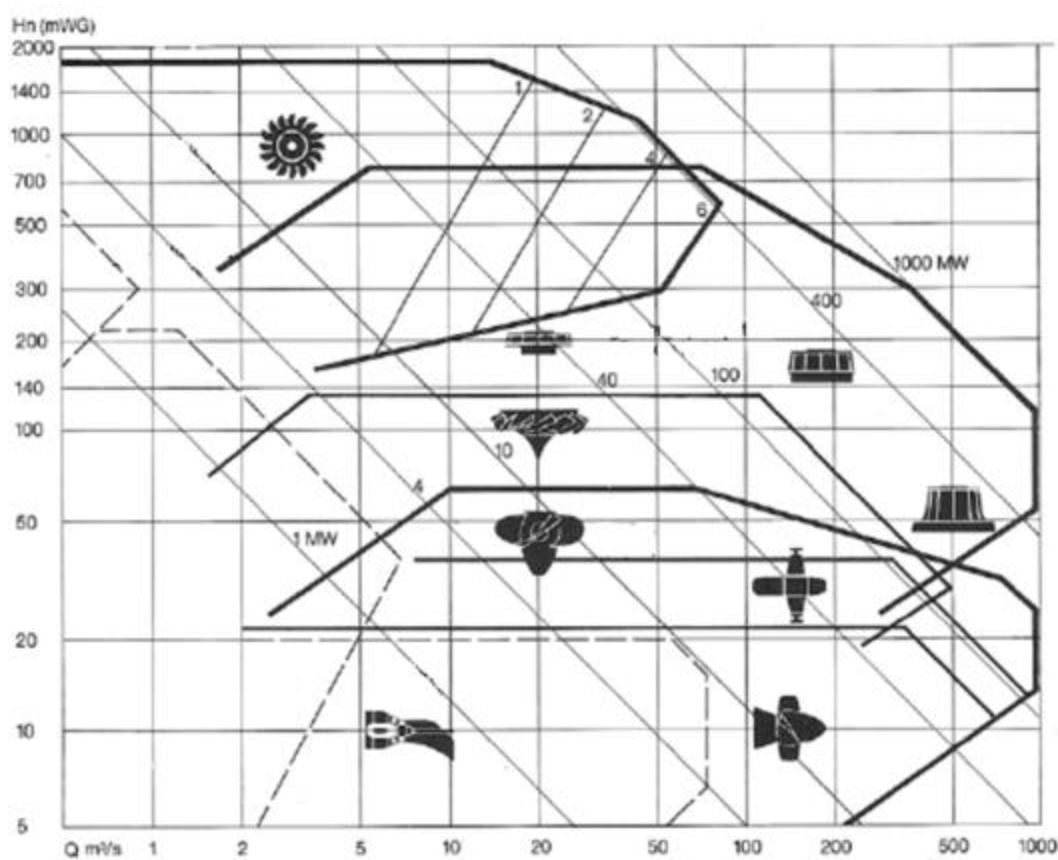
$$n_s = \frac{2600}{\sqrt{H}} \quad (12)$$

A fórmula para a turbina Pelton, de acordo com Simone (2000), é apresentada na equação (13), em que: “Ro” é o número de rotores que a turbina possui e A_{PE} está enquadrado entre 485 a 535. Simone (2000) sugere adotar $A_{PE} = 510$.

$$n_s = \sqrt{Ro} \times \frac{A_{PE}}{\sqrt{H}} \quad (13)$$

No entanto, de forma prática e sem necessitar de qualquer cálculo matemático, Raabe (1985) propôs a organização indicada na Figura 15, baseada nos valores de queda (H) e vazão (Q).

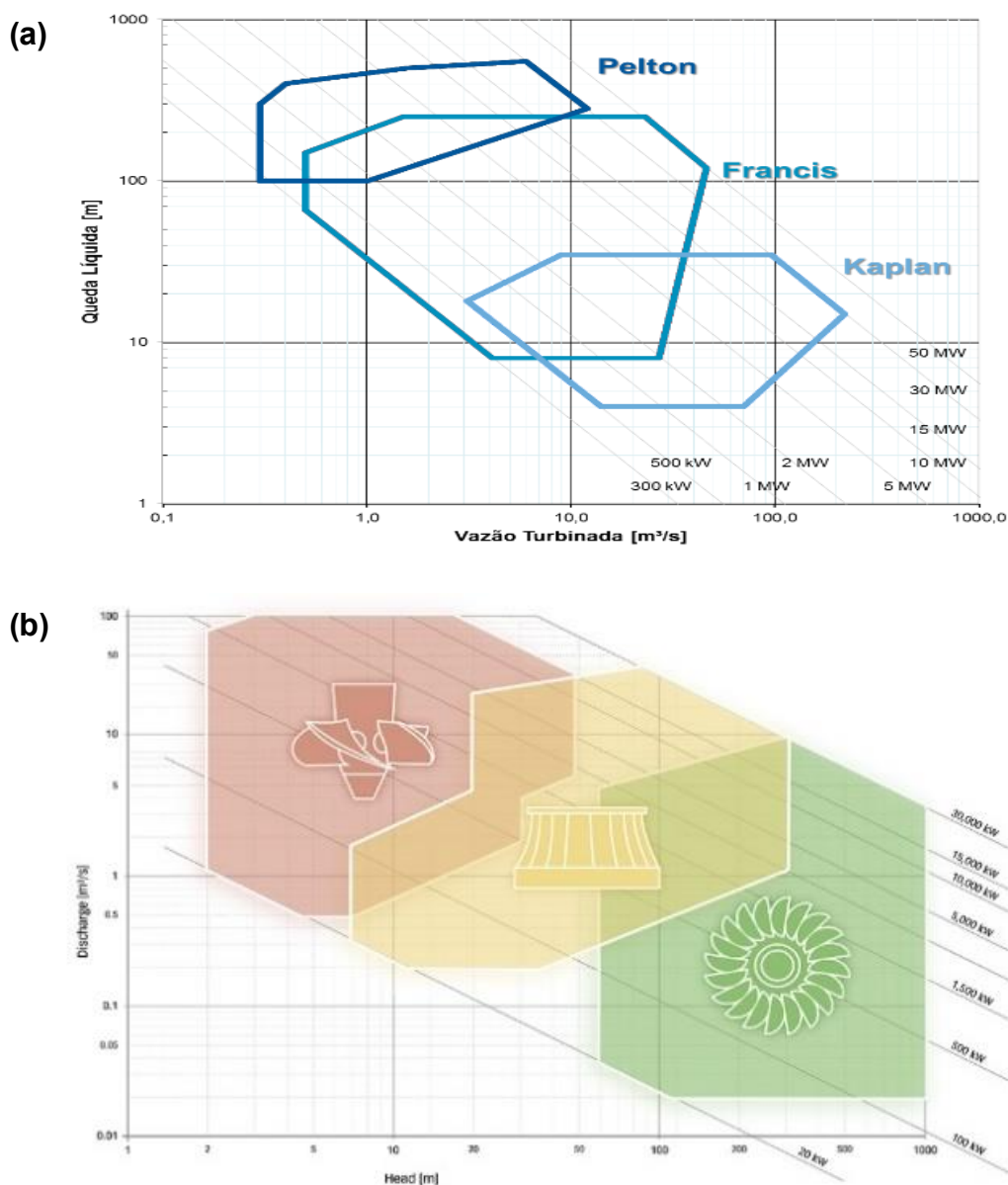
Figura 15 - Ábaco de pré-seleção de turbinas hidráulicas

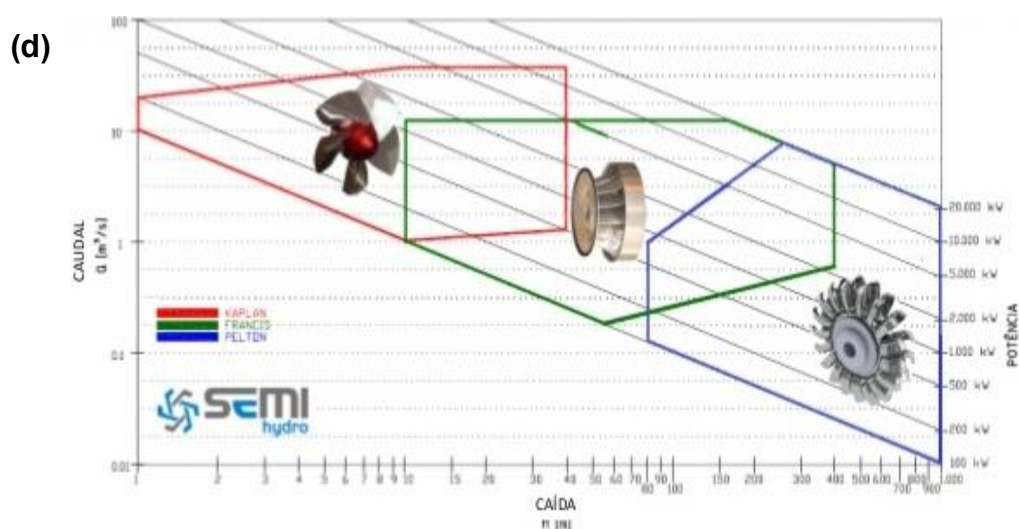
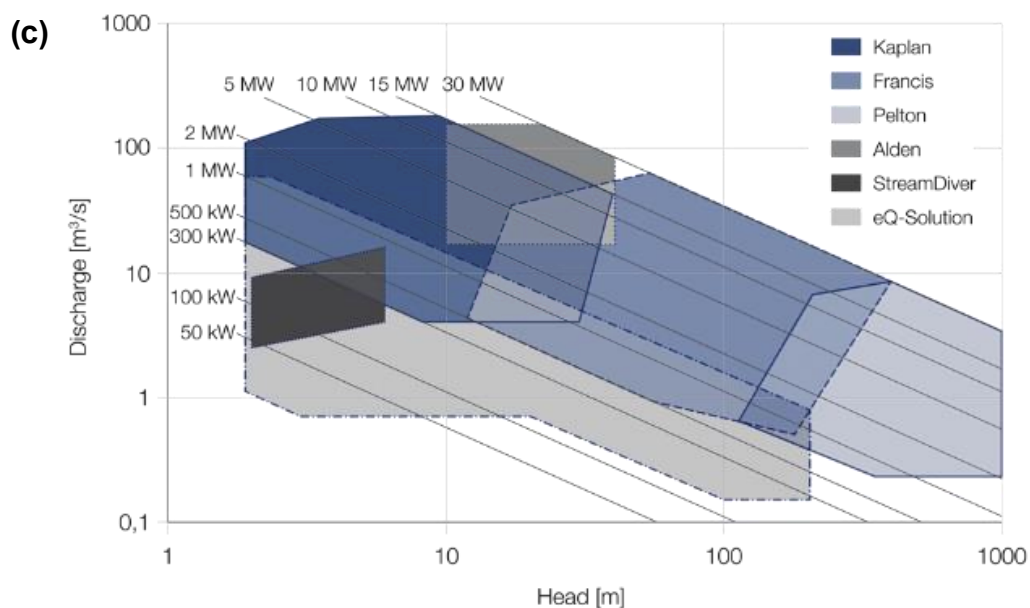


Fonte: Raabe, 1985.

Esta mesma forma de apresentação é seguida pelos tradicionais fabricantes de turbinas, que têm disponibilizado para consultas os gráficos de seleção de turbinas de seu respectivo portfólio. Haja vista o aprimoramento empregado no desenvolvimento de turbinas, pequenas, porém notáveis, diferenças podem ser observadas no range de aplicação, quando comparados dois ou mais fabricantes. Na Figura 16, são demonstrados os gráficos de seleção dos principais fabricantes de turbinas hidráulicas.

Figura 16 - Gráficos de pré-seleção de turbinas por fornecedores





Fonte: (a) Weg, 2018; (b) Andritz, 2018; (c) Voith, 20-?; (d) SEMI, 2016, p.6.

É importante frisar que a velocidade específica não é a velocidade (angular) real da turbina a ser aplicada no aproveitamento em estudo. A velocidade da turbina (a ser calculada) normalmente deve obedecer às condições de rotações síncronas para efeitos de funcionamento do gerador elétrico. No entanto, por não fazer parte do escopo desta dissertação, não será aqui apresentado. O mesmo vale para o cálculo do diâmetro do rotor, o qual definirá as dimensões finais da turbina geometricamente semelhante à Turbina Unidade ou Turbina Padrão, de acordo com a relação adotada para classificação.

Para Zhou *et al.* (2014), os principais fatores que influenciam na seleção da turbina - análise e investigação - foram levados em consideração apenas nos últimos

anos. Citam diversos autores que têm contribuído com o assunto, como, por exemplo, Gordon (2003), cujo trabalho buscou otimizar o processo de escolha do tipo de turbina por meio do emprego de análise computacional com parâmetros técnicos, como *input*.

2.4 MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO COMPENSATÓRIOS

A tomada de decisão com utilização de múltiplos critérios ou *Multicriteria Decision Making* (MCDM) é considerada uma tomada de decisão complexa envolvendo fatores quantitativos e qualitativos (MARDANI *et al.*, 2015). Os autores esclarecem que o MCDM tem por função designar uma alternativa preferida, classificar alternativas em um pequeno número de categorias e/ou classificar alternativas em uma ordem de preferência subjetiva. Em suma, os métodos MCDM existem para ajudar as pessoas a tomarem decisões de acordo com suas preferências, nos casos em que há mais de uma alternativa em condições de atender aos requisitos.

Desde a década de 60, diversas técnicas e abordagens de MCDM têm sido sugeridas para a escolha de alternativas prováveis. Em seu trabalho, Mardani *et al.* (2015) buscaram as publicações realizadas em um histórico de 15 anos (a partir do ano 2000), para apontar os campos de aplicação e métodos mais usuais. Em um total de 393 trabalhos pesquisados, o destaque está para o campo de Pesquisa Operacional e Computação Flexível, com 27,7%; seguido do campo de Energia, Meio Ambiente e Sustentabilidade, com aproximadamente 13,5%. Quanto às ferramentas utilizadas, dentre as mais conhecidas estão: AHP (25,6%); TOPSIS (11,4%); ELECTRE (8,6%); PROMETHEE (6,6%) e VIKOR (3,6%).

Gavade (2014) relata, em seu trabalho, uma análise em relação aos principais métodos MCDMs, apontando os pontos fortes e fraquezas de cada um dos métodos, além de listar as preferências de aplicação em algumas áreas de interesse. Uma visão global sobre as principais técnicas MCDM pode ser verificada em Shimray, Singh e Mehta (2017).

Quando verificada a aplicação de MCDM em problemas de gerenciamento de energia, Mardani *et al.* (2017) relacionam 196 trabalhos publicados entre os anos de 1995 a 2015. Os autores indicam 13 campos de aplicação com a respectiva participação: Avaliação de impacto ambiental (15,8%); Gerenciamento de energia

(10,7%); Construção e gestão ambiental (10,7%); Avaliação de sustentabilidade (9,2%); Gestão de resíduos (8,2%); Energia renovável (6,1%); Tópicos de gerenciamento verde (6,1%); Gestão de recursos hídricos (5,1%); Mudança climática (5,1%); Sustentabilidade energética (4,6%); Gestão de terras (4,1%); Avaliação ambiental estratégica (3,6%) e outras áreas ambientais (10,7%). Em relação aos métodos utilizados: AHP (25%); TOPSIS (5,1%); ELECTRE (4,6%); PROMETHEE (5,1%) e VIKOR (2,5%). Todos os métodos citados são considerados de aplicação genuína ou com utilização da abordagem *Fuzzy*.

A abordagem *Fuzzy* tem o propósito de considerar a subjetividade no processo de tomada de decisão, por meio de variáveis linguísticas associadas a conjuntos de números *Fuzzy*. Sendo o MCDM provido de métodos sistemáticos e racionais, a adoção da abordagem *Fuzzy* permitiu considerar a capacidade cognitiva humana. Em seu trabalho, Abdullah (2013) traz uma breve revisão sobre a tomada de decisão por vários critérios difusos e suas aplicações. Mardani, Jusoh, e Zavadskas (2015) identificaram mais de 400 importantes trabalhos relacionados às técnicas de decisão multicritério considerando a abordagem *Fuzzy* (FMCDM), publicados durante duas décadas, a partir de 1994.

No campo de energias renováveis, escopo desta dissertação, vários trabalhos foram publicados nos últimos anos para a seleção de fontes de energia (solar, eólica, hidráulica e de biomassa) e para os mais variados propósitos de aplicação (seleção de locais de instalação, seleção de fornecedores, seleção de materiais de fabricação, seleção de políticas e planejamento, seleção de programas ambientais, entre outros). O trabalho de Suganthi, Iniyan e Samuel (2015) apresenta uma revisão completa dos mais variados métodos MCDM aplicados a sistemas de energia renováveis.

Siksnyte *et al.* (2018) exploraram 105 artigos recentes relacionados a questões de sustentabilidade energética e métodos MCDM, com o objetivo de apresentar uma visão geral da aplicação dos métodos de tomada de decisão ao lidar com enigmas de desenvolvimento de energia sustentável. No entanto, ainda no século passado, Akash, Mamlook e Mohsen (1999) utilizaram o método AHP para realizar uma comparação entre as diferentes opções de produção de energia na Jordânia. Os sistemas considerados, além das usinas de combustíveis fósseis, foram o nuclear, solar, vento e a energia hidrelétrica.

Ainda no campo de energias renováveis, Kabak e Dağdeviren (2014) utilizaram o modelo híbrido de MCDM para priorizar fontes de energia na Turquia. Tasri e Susilawati (2014) associaram *Fuzzy* à AHP para seleção de alternativas de energia na Indonésia. No Paquistão, a avaliação das estratégias para o planejamento energético sustentável foi abordada por Solangi *et al.* (2019), por meio de uma abordagem integrada SWOT²-AHP e *Fuzzy*-TOPSIS, enquanto a seleção de estratégias de energias renováveis, com uso de *Fuzzy*-AHP e SWOT, foi abordada por Wang, Xu e Solangi, (2019).

Uma estrutura híbrida de tomada de decisão com múltiplos critérios, considerando a hesitação e a incerteza no processo de avaliação, foi desenvolvida por Li, Dong e Wang (2018), para avaliação abrangente do desempenho e da capacidade de concorrência para o sustentável desenvolvimento de quatro empresas de geração de energia, na China. Nesta estrutura, foram combinadas a teoria *Fuzzy* e o conjunto de termos linguísticos nebulosos hesitantes (HFLTS³) com os métodos tradicionais AHP e VIKOR, onde o método HFLTS-AHP foi usado para determinar a alocação de peso dos critérios e o *Fuzzy*-VIKOR forneceu a classificação de desempenho das alternativas.

Em relação às aplicações relativas às hidrelétricas, podem-se destacar os trabalhos de Supriyasilp, Pongput e Boonyasirikul (2009) que utilizaram a técnica MCDM para priorização de locais de instalação de usinas, na Tailândia, além de Rosso *et al.* (2014), cujos autores adotaram o método MCDM para solucionar os problemas de conflitos de interesses dos *stakeholders* no processo de instalação de usinas hidrelétricas.

Em relação às estratégias operacionais das plantas hidrelétricas, Kumar e Singal (2015c) aplicaram o método MCDM para selecionar a melhor planta em operação baseado em desempenho. Özcan, Ünlüsoy e Eren (2017) adotaram o uso da técnica para selecionar a estratégia de manutenção de hidrelétricas. Majumder *et al.* (2019) utilizaram métodos MCDM (mais precisamente *Fuzzy*-AHP e TOPSIS) para seleção de indicadores para análise da confiabilidade do desempenho em usinas.

² “Strengths”, “Weaknesses”, “Opportunities” e “Threats”, em Inglês.

³ Hesitant *Fuzzy* Linguistic Term Set, em Inglês.

Mais especificamente MCDM aplicados à seleção de equipamentos podem ser observados nos trabalhos de Williamson, Stark e Booker (2014), cuja utilização remete à definição de turbina hidráulica para a baixa queda e baixíssima potência (menores que 5kW); Kumar e Singal (2015b), que utilizaram o método multicritério para selecionar material de fabricação de conduto forçado e Adhikary *et al.* (2013), que abordam a seleção de fornecedores/fabricantes de turbinas hidráulicas para pequenas usinas na Índia.

2.5 ABORDAGEM DOS CONJUNTOS DIFUSOS (*FUZZY SETS*)

A teoria dos conjuntos *Fuzzy* foi introduzida por Lofti Asker Zadeh, em 1965. Posteriormente, em 1975, Bellman e Zadeh incluíram a teoria nos problemas de MCDM, conforme relatam Nadaban, Dzitac e Dzitac (2016). Inicialmente, o objetivo de Zadeh era “proporcionar uma maneira natural de lidar com problemas em que a fonte de imprecisão seja a ausência de critérios claramente definidos...”. Neste sentido, Zimmermann (2001) complementa o entendimento em que as decisões reais muitas vezes não são nítidas e deterministas, e, portanto, não podem ser descritas com precisão, como na lógica booleana $[0,1]$, transcrita como “verdadeiro e falso”, por exemplo.

Para que os julgamentos possam ser expressos sem tamanha precisão, variáveis linguísticas foram inseridas por Zadeh e Jose (1975). Zimmermann (2001) transcreveu o conceito de variáveis linguísticas como variáveis cujos valores não são números, mas palavras ou sentenças em uma linguagem natural ou artificial, cujos termos linguísticos são associados a conjuntos difusos.

Mardani, Jusoh e Zavadskas (2015) citam que os números *Fuzzy* foram utilizados por Zadeh e Jose (1975) para ajudar as variáveis linguísticas a serem expressas apropriadamente, pois estas são empregadas para articular o pensamento e as percepções subjetivas e, com isso, possibilitam a computação dos julgamentos. A estrutura apresentada por Zadeh e Jose (1975) consiste em utilizar conjunto de números *Fuzzy*, ou conjuntos difusos, denotando a pertinência de julgamento para um determinado conjunto, que pode assumir qualquer valor entre zero e um $[0...1]$.

Conforme Abdullah (2013), para explicar os conjuntos *Fuzzy* é necessário entender os conjuntos clássicos. Os conjuntos clássicos são, por definição, uma

coleção de objetos bem definidos. No entanto, os objetos podem pertencer ou não ao conjunto. O conjunto clássico A no universo U ($A \subset U$) é normalmente caracterizado pela função $\mu_A(x)$ que assume o valor de 1 ou 0 se $x \in U$ é um membro de A , ou não, respectivamente, conforme equação (14).

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in A \\ 0, & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (14)$$

Quando se considera que a função $\mu_A(x)$ possa receber valores do intervalo zero a um $[0, 1]$, o conceito de pertencimento não é mais nítido e sim difuso na representação de pertencimento parcial (ABDULLAH, 2013). A equação (15) retrata o conjunto difuso \mathbb{R} , onde $\mu_R(x)$ é a função associação que especifica o grau de pertencimento de qualquer elemento A ao conjunto *Fuzzy* \mathbb{R} conforme equação (15).

$$\mathbb{R} = \{(x, \mu_R(x)) / x \in A, \mu_R(x) \in [0,1]\} \quad (15)$$

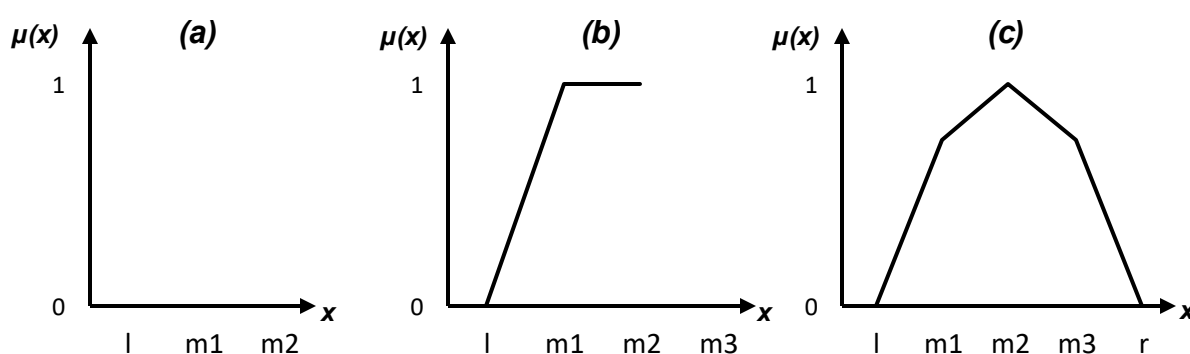
Abdullah (2013) cita o trabalho de Ragin (2000), o qual sintetizou a lógica dos conjuntos *Fuzzy* por meio de uma explicação simples: a ideia básica dos conjuntos difusos é permitir o escalonamento das pontuações de associação e, com isso, obter a filiação parcial ou difusa. Em linhas gerais, uma pontuação igual a 1 indica a associação total ao conjunto, enquanto que valores próximos (0,8 ou 0,9, por exemplo) sugerem uma associação forte, mas parcial. Números menores que 0,5 e maiores que 0 (0,2 ou 0,3, por exemplo), indicam uma associação fraca, com objetos mais “fora” do que “dentro” do conjunto. Já números iguais a 0 indicam a total não adesão ao conjunto. O autor reforça que conjuntos difusos combinam avaliação quantitativa e qualitativa, podendo ser utilizados na tomada de decisão com múltiplos critérios.

O número *Fuzzy* é definido por Rentería (2006) como um caso especial de conjunto *Fuzzy* \mathbb{R} que define um intervalo *Fuzzy* nos números reais (números não definidos com precisão), cujo intervalo é dado por 2 pontos extremos (mínimo e máximo) e um (ou mais) ponto(s) intermediário(s) que representa(m) o(s) valor(es) mais provável(is). Segundo Zimmermann (2001), os números *Fuzzy* mais comuns são do tipo triangular e trapezoidal, embora seja possível utilizar outros números,

como mostram Mondal e Mandal (2017), em uma abordagem com números *Fuzzy* pentagonais, por exemplo.

Assim, considerando os conjuntos *Fuzzy* e os intervalos de números *Fuzzy* aplicados, é possível observar os arranjos dos números nos conjuntos, como demonstrado na Figura 17, sendo que a distribuição dos elementos internos não necessariamente precisa ser simétrica.

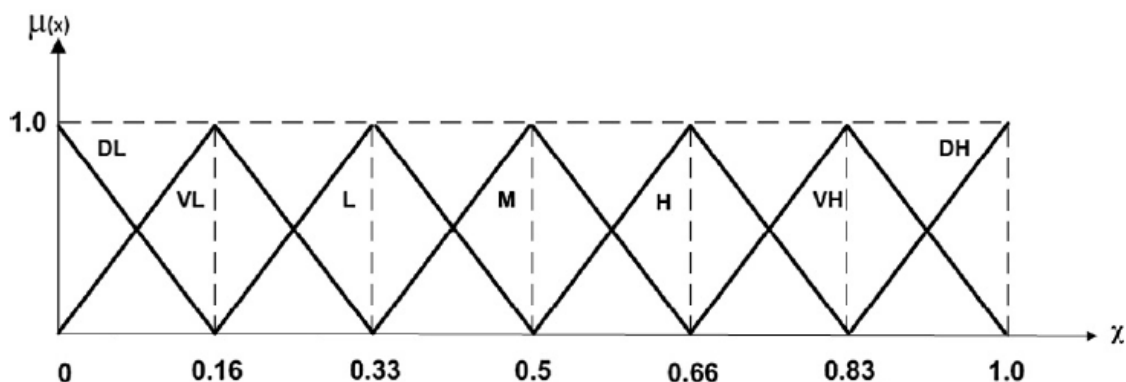
Figura 17 - Estrutura dos números *Fuzzy*: (a) Número *Fuzzy* triangular; (b) Número *Fuzzy* trapezoidal; (c) Número *Fuzzy* Pentagonal



Fonte: O autor, 2019.

Tomando o número *Fuzzy* triangular como referência, e aplicando o entendimento de variável linguística, a representação pode ser entendida conforme Karsak e Dursun (2015), reproduzida na Figura 18, em que DL = Definitivamente Baixo; VL = Muito Baixo; L = Baixo; M = Médio; H = Alto; VH = Muito Alto e DH = Definitivamente Alto. *Em que:* DL: $(0;0;0,16)$; VL $(0;0,16;0,33)$; L: $(0,16;0,33;0,50)$; M: $(0,33;0,50;0,66)$; H: $(0,50;0,66;0,83)$; VH: $(0,66;0,83;1)$ e DH: $(0,83;1;1)$.

Figura 18 - Termos das variáveis linguísticas



Fonte: Karsak e Dursun, 2015.

Um exemplo frequentemente atribuído a uma sentença de linguagem específica é a sensação de calor. Neste caso, os valores da variável linguística calor são: *quente; muito quente; muitíssimo quente; bastante quente; não muito quente; não quente e mais ou menos quente*. As sentenças são compostas pelo rótulo *quente*; pela negativa *não*; pelo conectivos *e* e *mais*; e os modificadores *muito, muitíssimo, um tanto, bastante e mais ou menos*, como demonstrado por Rheingantz (2002). Mesmo assim, o número *Fuzzy* pode ser igualmente atribuído.

De maneira geral, para Gomide, Gudwin e Tanscheit (2015), as variáveis linguísticas tem como função principal prover uma forma organizada para uma caracterização aproximada dos fenômenos complexos ou mal definidos. As variáveis linguísticas buscam, desta forma, atender às situações nebulosas de decisão, por meio de uma maneira sistemática e calculável, mesmo para os problemas mais complexos de decisão humana.

3 METODOLOGIA

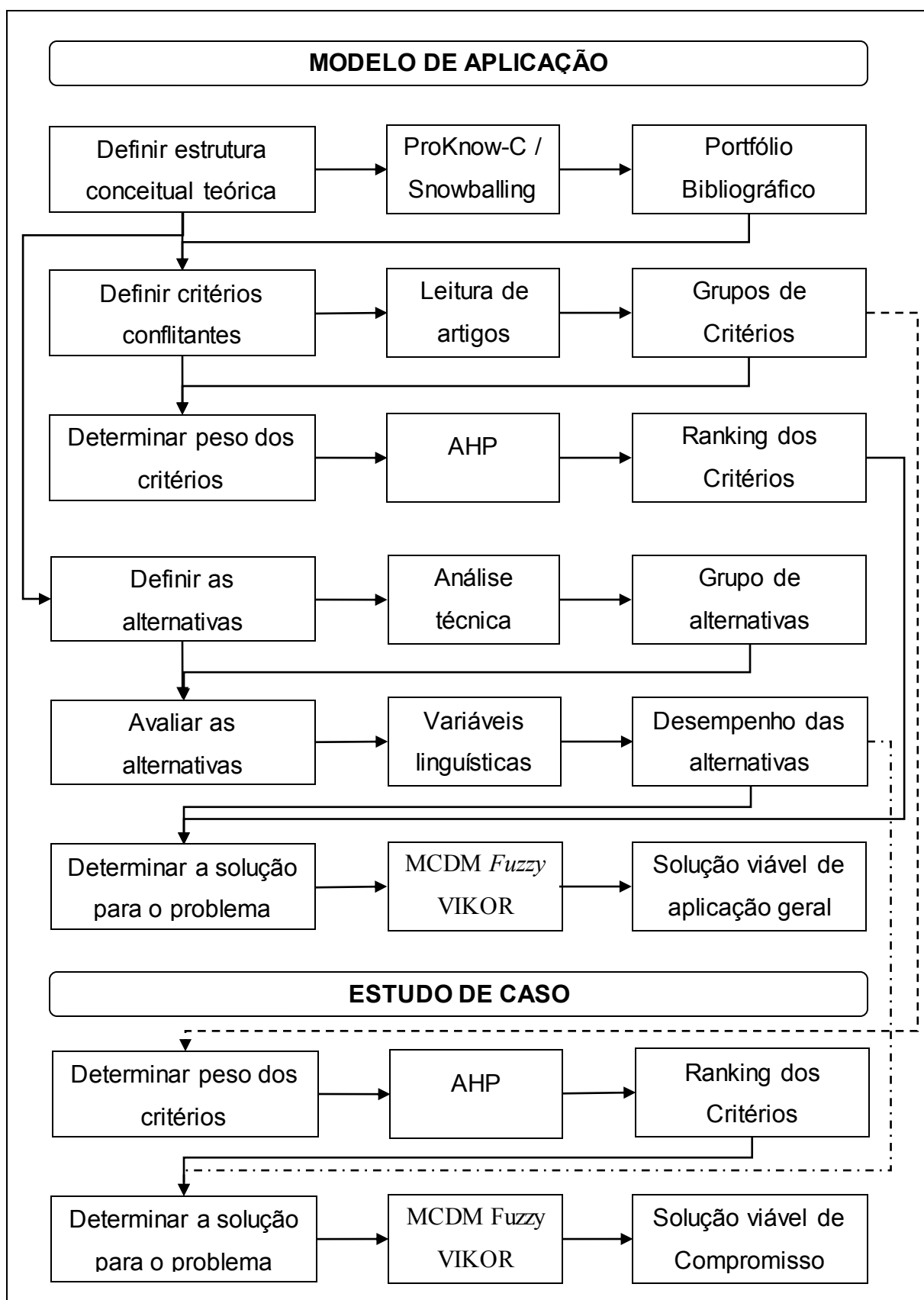
Este capítulo tem por objetivo descrever a metodologia utilizada para o desenvolvimento do modelo de pré-seleção de turbinas hidráulicas a serem empregadas em projetos de pequenas usinas hidrelétricas, caracterizadas como PCHs e CGHs. As subdivisões deste capítulo consideram a apresentação de um *framework* para esclarecer a lógica de construção do modelo, a estruturação da base de dados, as etapas de desenvolvimento do modelo e as informações sobre o estudo de caso em que o modelo é aplicado.

3.1 *FRAMEWORK* PROPOSTO PARA A CONSTRUÇÃO DO MODELO

O desafio de pré-selecionar o melhor modelo de turbina, de fato, exige grande experiência dos projetistas e capacidade de idealizar soluções de baixo custo e alto desempenho. Então, surge a necessidade de captar este conhecimento tácito e transformá-lo em um modelo de auxílio à tomada de decisão. O *framework* proposto para este modelo é mostrado na Figura 19. A estrutura consiste na sequência lógica de construção do modelo e aplicação em um estudo de caso.

Em suma, na etapa de construção do modelo estão agrupadas as ações de definição do portfólio bibliográfico para auxílio à determinação dos critérios, seleção das alternativas, determinação do peso dos critérios, avaliação das alternativas e a solução de aplicação geral. Entende-se como solução de aplicação geral aqueles projetos onde ocorre a concorrência dos critérios levantados e adota-se como solução aquela proposta nesta dissertação.

Para o estudo de caso, são tomadas as informações de desempenho das alternativas, uma vez considerada a opinião especializada, conforme item 3.4.2. No entanto, o peso dos critérios é determinado segundo a opinião do investidor, por meio de seu corpo técnico. Logo, são computados novos pesos à determinação da solução de compromisso que atenda a este projeto específico.

Figura 19 - *Framework* da dissertação

Fonte: O autor, 2019.

3.2 BASE DE DADOS PARA A DETERMINAÇÃO DOS CRITÉRIOS DA PRÉ-SELEÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS

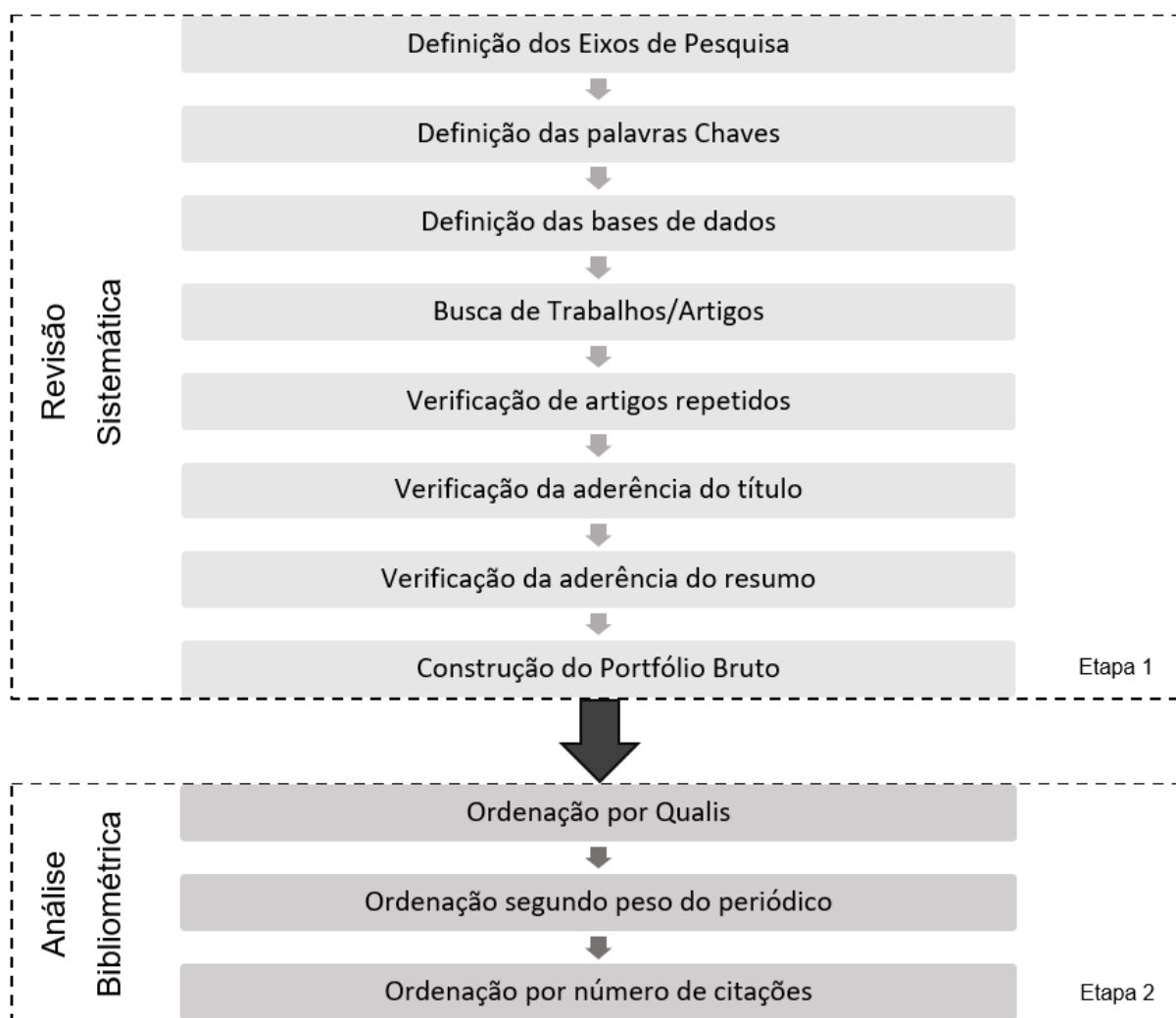
De acordo com a norma ABNT NBR 6445:2016 (Associação Brasileira De Normas e Técnicas, 2016), a obra civil de uma usina é projetada de acordo com os requisitos dos equipamentos. Notadamente, o tipo de turbina pode interferir no tamanho das estruturas civis e demais equipamentos de uma usina hidrelétrica. Para validar esta teoria, um levantamento bibliográfico foi realizado com o propósito de definir um grupo de critérios técnicos, composto por estruturas e equipamentos que sofram influência por ocasião da turbina hidráulica selecionada.

O levantamento bibliográfico foi baseado no método *Proknow-C (Knowledge Development Process – Constructivist)*, desenvolvido por Ensslin, Lacerda e Tasca (2010), com pequenas adaptações no processo estruturado de investigação por meio de uma revisão sistêmica e análise bibliométrica, cujo objetivo foi selecionar, na literatura disponível, as obras mais relevantes para o desenvolvimento desta dissertação. A Figura 20 resume as etapas do processo utilizadas nesta pesquisa.

Inicialmente foram buscados alguns artigos pertinentes ao tema em estudo, de modo que fosse possível estabelecer os eixos de pesquisa e as palavras-chave desta dissertação, demonstrando maior assertividade ao proposto. Assim, os eixos e suas respectivas palavras-chave são: *Renewable Energy (Small Hydro, Hydropower)*, *Equipments and Structure (Hydro Turbine, Equipments, Civil Works)* e *Decision Technique (Multi Criteria, Selection, Optimization, Feasibility)*. As interações proporcionaram um total de 24 combinações.

As bases de dados consideradas para as buscas de material foram: *IEEE Xplore*, *Science Direct*, *Scopus*, *Springer* e *Web of Science*, definidas em função da representatividade e alinhamento à área de Engenharias III da CAPES. Para busca, foram delimitados o ano de publicação (2008) e o tipo de publicação (artigos e materiais de conferências). Foram selecionados, ainda, os campos: título, resumo e palavras-chave. O algoritmo de pesquisa utilizado foi “AND”.

Figura 20 - Escopo resumido da Revisão Sistemática e Análise Bibliométrica



Fonte: O autor, 2019.

A busca aplicada retornou, ao todo, 1447 artigos. Quando eliminados os repetidos, foram subtraídos 643 artigos, restando assim 804. Após leitura dos títulos em verificação ao alinhamento ao tema de pesquisa, foram descartados 741 artigos. Na etapa de leitura dos resumos, 05 títulos foram descartados em função de não estarem disponíveis e outros 38, que continham resumos que não apresentavam aderência ao tema em estudo. Após leitura dos resumos, 20 artigos estavam aptos a compor o portfólio final para leitura completa.

Como o número de trabalhos obtidos foi considerado baixo, foi necessário incrementar a base de dados com artigos citados a partir das referências do material selecionado, com identificação à técnica conhecida como *Snowballing*, ou bola de neve. Ao todo, foram incorporados 29 artigos, considerando a mesma sistemática de avaliação: verificação da aderência por meio da leitura do título e resumo. Assim, 49

artigos estavam disponíveis para leitura completa, encerrando a etapa correspondente à revisão sistemática.

Após leitura de todo material disponível, já na etapa de análise bibliométrica, realizou-se o reconhecimento científico. De cunho qualitativo, os materiais foram elencados segundo classificação dos periódicos do Quadriênio 2013-2016 da plataforma Sucupira, verificando-se o Qualis do periódico em Engenharias III. Depois, foram ranqueados em função do índice SJR e do número de citações. Foram separados para composição da base de dados um total de 39 artigos. Estes foram utilizados para o embasamento teórico da determinação dos critérios do modelo a ser desenvolvido. Os outros 10 foram mantidos na base de dados secundária, para uso se verificada necessidade. Para o gerenciamento da base de dados, utilizou-se versão *free* do *software* Mendeley®.

Um resumo geral das etapas da revisão sistemática da literatura é apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Resumo da revisão sistemática

| Eixos de Pesquisa | | | | |
|--|---|---------------|--|-----------------------|
| Renewable Energy | Equipments and Structure | | Decision Technique | |
| Small Hydro Hydropower | Palavras-chave por Eixo de Pesquisa Hydro Turbine Equipments Civil Works | | Multi Criteria Selection Optimization Feasibility | |
| Banco de Busca e Número de Artigos | | | | |
| IEEE Xplore 40 | Science Direct 46 | Scopus 382 | Springer 679 | Web of Science 300 |
| Total de Artigos encontrados: 1447 | | | | |
| Número de artigos repetidos: 643 | | | | |
| Artigos com título não aderente ao tema de pesquisa: 741 | | | | |
| Artigos com resumo não aderente ao tema de pesquisa: 38 | | | | |
| Artigos não disponíveis para leitura: 05 | | | | |
| Artigos restantes: 20 | | | | |
| Artigos incluídos com base nas referências dos artigos restantes: 29 | | | | |
| Total de artigos do PB: 49 | | | | |
| Artigos na base principal: 39 | | | | |
| Artigos na base secundária: 10 | | | | |

Fonte: O autor, 2019.

3.3 DEFINIÇÃO DAS ALTERNATIVAS

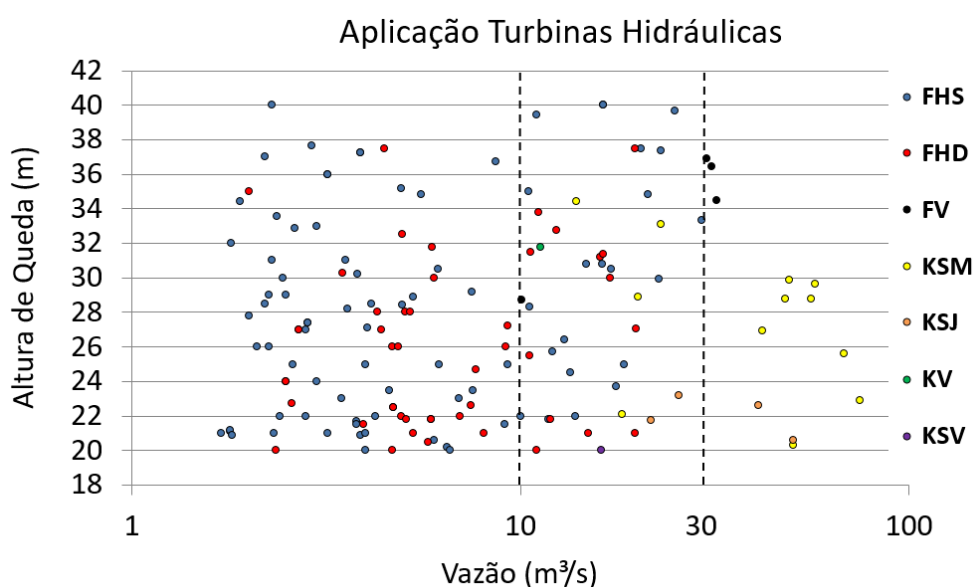
A pré-seleção de turbinas hidráulicas é uma etapa necessária ao desenvolvimento do projeto básico de um empreendimento hidrelétrico, na busca

pela obtenção das aprovações e licenças junto aos órgãos competentes. Neste sentido, torna-se necessário uma maior assertividade quanto ao modelo de turbina a ser empregado, pois revisões no projeto aumentam os custos, além do prazo de execução.

Esta dissertação tem como objetivo pré-selecionar turbinas hidráulicas para faixas restritas de queda e vazão, correspondente a 20 m a 35 m, para alturas de queda, e 10 m³/s a 30 m³/s, para valores de vazão. Com isso, em observação à Figura 15 (seção 2.3) é possível determinar inicialmente os seguintes modelos de turbinas em potencial: FHS, FHD, FV, KV, KSM, KSJ e KSV. Nesta dissertação, considerou-se apenas turbinas com rotores Francis e Kaplan (pás móveis). Portanto, Turbinas Hélices/*Propeller* (pás fixas) não foram consideradas.

Para certificação da aplicação prática dos modelos citados na literatura, foi possível obter, do banco de dados de uma renomada empresa fabricante de turbinas hidráulicas no mercado nacional, o histórico de aplicações dos últimos 50 anos. Inicialmente, optou-se por resgatar as informações disponíveis considerando um range de queda de 20 m a 40 m, dado conhecimento prévio quanto à aplicação dos modelos citados. Foram verificados 152 projetos implantados, cujos valores de vazão consideravam desde 1 m³/s até 80 m³/s. A dispersão dos dados é apresentada na Figura 22.

Figura 22 - Aplicação de turbinas hidráulicas



Fonte: O autor, 2019.

Na Tabela 1, identifica-se a presença de todos os modelos de turbinas para a faixa de vazão entre 10 e 30m³/s. Para vazões menores que 10m³/s, percebe-se a predominância de modelos FHS e FHD, e para vazão acima de 30m³/s, observa-se a predominância de variantes dos modelos Kaplan e a FV.

Tabela 1 - Participação dos modelos de turbina por range da vazão

| Modelo | Total | Q<10 | 10≤Q≤30 | Q>30 |
|--------|-------|------|---------|------|
| FHS | 85 | 63 | 22 | 0 |
| FHD | 46 | 33 | 13 | 0 |
| FV | 4 | 0 | 2 | 2 |
| KV | 1 | 0 | 1 | 0 |
| KSM | 12 | 0 | 3 | 9 |
| KSJ | 4 | 0 | 2 | 2 |
| KSV | 1 | 0 | 1 | 0 |

Fonte: O autor, 2019.

Conforme a Tabela 1, os modelos KV e KSV são pouco utilizados no cenário nacional de pequenas usinas, quando comparados aos demais modelos. Por esse motivo, as turbinas KV e KSV foram desconsideradas como alternativas neste estudo, mesmo que verificada a possibilidade técnica de aplicação, quanto à faixa de operação definida. Assim, as alternativas utilizadas neste estudo foram os modelos de turbinas: FHS, FHD, FV, KSM e KSJ.

3.4 MODELO DE PRÉ-SELEÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS

Nesta seção são apresentadas as etapas para estruturar o modelo de pré-seleção de turbinas hidráulicas para faixas de operação definidas na seção 3.3. A partir da determinação dos critérios (seção 4.1.1) e definidas as alternativas (seção 3.3), foi construído um sistema de análise e resolução estruturado que considerasse a interação entre critérios e alternativas.

Por se tratar de um modelo que se utiliza da abordagem multicritério, de fato, houve necessidade de correlacionar critérios e alternativas para resolver os problemas de conflitos existentes. A determinação dos pesos na correlação entre critérios, conforme julgamento dos especialistas, foi obtida por meio do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), enquanto a resolução da problemática, no intuito

de encontrar a solução de compromisso aceitável, foi realizada pelo método *Fuzzy-VIKOR*.

3.4.1 Determinação do Peso dos Critérios com Método AHP

A determinação da importância (peso) de cada critério é uma etapa fundamental na aplicação de métodos multicritério. Para realizar essa etapa, utilizou-se o Processo Hierárquico Analítico (*AHP*), conhecido como uma técnica estruturada para auxílio à tomada de decisões complexas.

AHP é um método de decisão multicritério discreto (*MCDM*). Desenvolvido por Saaty (1977), é um método hierárquico, ou seja, a decisão é estruturada em diferentes níveis (objetivo, critérios e alternativas) sendo baseada no julgamento pareado entre os diferentes níveis. Nessa etapa, o método será utilizado apenas para determinar o peso dos critérios. A principal vantagem apresentada por esse método é a conversão de julgamentos qualitativos (avaliação de especialistas) em valores quantitativos (pesos).

Inicialmente se deve determinar uma escala para avaliação dos julgamentos pareados. A escala proposta por Saaty (1977) é uma escala linear 1-9, considerando os valores pares (2, 4, 6, 8), intermediários entre os dois julgamentos adjacentes. A escala é apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 - Escala de Saaty.

| Intensidade da Importância | Definição Saaty (1977) | Definição Adaptada |
|-----------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 1 | Igual Importância | Importância Igual |
| 2 | - | Importância Leve |
| 3 | Fraca Importância | Importância Fraca |
| 4 | - | Importância Média |
| 5 | Forte Importância | Importância Forte |
| 6 | - | Importância Bem Forte |
| 7 | Importância Muito Forte | Importância Muito Forte |
| 8 | - | Importância MUITÍSSIMO Forte |
| 9 | Importância Absoluta | Importância Absoluta |

Fonte: O autor, 2019.

Uma matriz quadrada de ordem igual ao número de critérios é construída realizando-se os julgamentos pareados. Nessa matriz, os elementos da diagonal principal são iguais a 1. Acima da diagonal principal, estão os valores dos julgamentos pareados e abaixo da diagonal principal, os valores recíprocos dos julgamentos pareados, ou seja, os valores inversos dos julgamentos. Essa matriz é denominada Matriz de Decisão. A partir dessa matriz se determina o vetor que apresenta o peso dos critérios em função das preferências dos decisores (julgamentos pareados).

No trabalho de Saaty (1977) esse vetor era determinado pelo auto vetor da Matriz de Decisão. Porém, existem outros métodos computacionais para a obtenção do vetor. Nesta dissertação será adotado o método de Normalização Aditiva, o qual apresenta pouca complexidade computacional e bons resultados, conforme Srdjevic (2005). A Normalização Aditiva é um método algébrico que consiste em obter a soma dos elementos da Matriz de Decisão, gerar uma nova matriz a partir da normalização dos elementos da matriz pela sua respectiva soma das colunas e, nessa matriz, obter o vetor pela média dos elementos da linha normalizados, conforme as equações (16) e (17).

$$a'_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=j}^m a_{ij}, j = 1, 2, \dots, m. \quad (16)$$

$$P_i = (1/m) \sum_{j=1}^m a'_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, m. \quad (17)$$

Em que:

a_{ij} : é a importância relativa do elemento decisão;

a'_{ij} : é a importância relativa normalizada;

P_i : é o vetor prioridade normalizado.

Após determinação do vetor de prioridades, é necessário avaliar a consistência dos julgamentos, que, no trabalho de Saaty (1977), era determinada pela análise do autovalor da Matriz de Decisão. Porém, quando se utiliza o método de Normalização Aditiva, se recomenda utilizar a Razão da Consistência Harmônica (HCR) proposta por Stein e Mizzi (2007).

O cálculo da Razão da Consistência Harmônica (HCR) é obtido conforme equação (18), dada por:

$$HRC = \frac{HCI}{HRI} \quad (18)$$

O Índice Harmônico Randômico (HRI) é apresentado na

Tabela 2, equivalente ao tamanho da matriz.

Tabela 2 - Índice Harmônico Randômico (HRI) para valores de Matrizes (n)

| (n) | 3x3 | 4x4 | 5x5 | 6x6 | 7x7 | 8x8 | 9x9 | 10x10 | 15x15 | 20x20 | 25x25 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| HRI | 0,550 | 0,859 | 1,061 | 1,205 | 1,310 | 1,381 | 1,437 | 1,484 | 1,599 | 1,650 | 1,675 |

Fonte: Stein e Mizzi, 2007.

O Índice de Consistência Harmônica (HCI) é calculado pela equação (19).

$$HCI = \frac{[HM(s) - n](n + 1)}{n(n - 1)} \quad (19)$$

Em que: HM é a média harmônica dos elementos soma de cada coluna da Matriz de Decisão e n é o número de critérios considerados na matriz. Um julgamento é considerado consistente quando o resultado de HRC for menor que 0,08, para uma matriz de ordem 4 (STEIN; MIZZI, 2007).

A decisão do grupo dos decisores (DMs) é obtida por meio da média geométrica apresentada na equação (20), sem comprometer, assim, a propriedade de reciprocidade, conforme indicado por Ishizaka e Labib (2011). A normalização da média dos julgamentos é dada conforme a equação (21) Na determinação dos pesos dos critérios, foram avaliados os quatro grupos de critérios, para se

estabelecer a importância de cada grupo na avaliação com base na equação (22). Na sequência, os critérios de mesmo grupo foram avaliados, cada um em seu próprio grupo considerando o peso do grupo dos critérios correspondentes, de acordo com a equação (23), o que é denominado de peso global. Os cálculos foram realizados por meio do programa Microsoft Excel®.

$$w_j = (w_{j1} \times w_{j2} \dots w_{jn})^{1/n} \quad (20)$$

$$w = \frac{w_j}{\sum w_j} \quad (21)$$

$$R_i = \sum_{j=1}^m w \times P_{ij} \quad (22)$$

$$R = \sum_{j=1}^m w \times P_{ij} \times R_i \quad (23)$$

Em que:

w_j : é o índice bruto do julgamento;

w : é o índice normalizado do julgamento;

R_i : é a importância do grupo de critérios;

R : é a importância de cada critério ou o peso global.

3.4.2 Avaliação das Alternativas

Esta etapa consiste em avaliar o desempenho dos tipos de turbinas hidráulicas admitidas como alternativas ao presente estudo, pertencentes ao grupo cuja aplicação está compreendida no intervalo de dados de altura de queda e vazão, como relatado na seção 3.3.

Com o propósito de conferir adequado julgamento das alternativas frente aos critérios definidos, foram entrevistados quatro engenheiros de produto, especialistas em turbinas hidráulicas. Devido às incertezas no processo de decisão, e como forma

de aproveitar o conhecimento tácito dos especialistas em produto, foram estabelecidas variáveis linguísticas e adotado o número *Fuzzy* triangular, conforme indicado na Tabela 3.

Tabela 3 - Variável Linguística e Número *Fuzzy* Triangular

| Classificação | Variável Linguística | Número <i>Fuzzy</i> Triangular |
|---------------|----------------------|--------------------------------|
| Muito Baixo | VP | (0; 0; 0,17) |
| Baixo | P | (0; 0,17; 0,33) |
| Médio Baixo | MP | (0,17; 0,33; 0,5) |
| Médio | M | (0,33; 0,5; 0,67) |
| Médio Alto | MG | (0,5; 0,67; 0,83) |
| Alto | G | (0,67; 0,83; 1) |
| Muito Alto | VG | (0,83; 1,00; 1) |

Fonte: O autor, 2019.

O método *Fuzzy*-VIKOR, por sua vez, é utilizado para estabelecer uma solução de compromisso que atenda às preferências dos especialistas técnicos e se aproxime da solução ideal, considerando as alternativas ou tipos de turbinas disponíveis. Assim que conhecidos os julgamentos, a continuidade do cálculo do método *Fuzzy*-VIKOR é realizada e a solução de compromisso definida.

A agregação *Fuzzy* para opinião dos especialistas, com o objetivo de se obter um resultado único, é dado conforme indicado na seção 3.4.1, por meio do $minl_i$, $maxr_i$, e média geométrica para m_i .

3.4.3 Método *Fuzzy*-VIKOR

O método VIKOR (*ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje*) foi desenvolvido por Serafim Opricovic, como ferramenta de auxílio à decisão, para otimizar e resolver problemas discretos de múltiplos critérios, cujos critérios sejam incompatíveis e conflitantes. Registros indicam as ideias iniciais a partir de 1979 (DUCKSTEIN e OPRICOVIC, 1980), mas foi somente no ano de 2004 que obteve atenção internacional a partir da aplicação exposta por Opricovic e Tzeng (2004).

O método tem como proposta apresentar uma solução de compromisso viável e mais próxima à solução ideal. Nisso, critérios e alternativas são relacionados. Originalmente, VIKOR considera a utilização de conjunto de números *crisp*. Porém, como é relativamente difícil para os DMs fornecerem valores exatos

para os critérios em relação às alternativas, os dados são expressos em termos linguísticos, uma vez que para modelar esse tipo de incerteza nas preferências humanas, a lógica difusa é aplicada com muito sucesso (OPRICOVIC, 2007).

O algoritmo do modelo matemático do método é apresentado de forma detalhada por Opricovic (2007) e complementado mais tarde pelo mesmo autor (OPRICOVIC, 2011). São incluídos, no entanto, os aspectos de decisão em grupo, a partir de Wu, Ahmad e Xu, (2016), sendo a essência do método *Fuzzy-VIKOR* mostrada no passo a passo a seguir:

Etapa 1: Encontrar o melhor $f_i^* = (l_i^*, m_i^*, r_i^*)$ e o “pior” $f_i^- = (l_i^-, m_i^-, r_i^-)$, sendo d_{ij} a solução mais próxima do ideal, com $i = 1, 2, \dots, m$. A i ésima função pode representar custo ou benefício conforme as equações (24) e (25).

$$\text{Benefícios: } f_i^* = \max f_{ij} \text{ e } f_i^- = \min f_{ij} \quad (24)$$

$$\text{Custo: } f_i^* = \min f_{ij} \text{ e } f_i^- = \max f_{ij} \quad (25)$$

Como operadores de média, a partir de Vaníček, Vrana e Aly (2009), pode-se definir: $\min l_i$, $\max r_i$, e média geométrica para m_i .

Etapa 2: Calcular as distâncias d_i para cada uma das alternativas, de acordo com as equações (26) e (27).

$$\text{Benefícios} \rightarrow d_i = \frac{(f_i^* - f_{ij})}{(r_i^* - l_i^-)} \quad (26)$$

$$\text{Custos} \rightarrow d_i = \frac{(f_{ij} - f_i^*)}{(r_i^- - l_i^*)} \quad (27)$$

Etapa 3: Calcular os valores da soma ponderada difusa (S_j) e operador máximo *Fuzzy* (R_j) por meio da normalização (e defuzificação) ponderada da distância (d_i) conforme as equações (28) e (29):

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i \times d_i \quad (28)$$

$$R_j = \max_j(w_i \times d_i) \quad (29)$$

Em que: w são os pesos dos critérios, segundo a preferência do DM como a importância relativa entre os diversos critérios.

Etapa 4: Determinar os valores de S^*, S^-, R^*, R^- , a partir de S_j e R_j das alternativas:

$$S^* = \min_j S_j, \quad S^- = \max_j S_j,$$

$$R^* = \min_j R_j, \quad R^- = \max_j R_j$$

Etapa 5: Calcular os valores de mérito *Fuzzy* (Q_j) para cada uma das alternativas, por meio da equação (30):

$$Q_j = \frac{v(S_j - S^*)}{(S^- - S^*)} + \frac{(1 - v)(R_j - R^*)}{(R^- - R^*)} \quad (30)$$

Sendo: v o peso da estratégia de grupo para a maioria dos critérios. Com $0,7 > v > 0,3$, quando $v = 0,5$, não há priorização declarada para os benefícios associados à escolha da alternativa ou à alternativa que minimiza os prejuízos associados à escolha. Valores de v superior a 0,5 definem a priorização por benefícios associados à escolha da alternativa, enquanto que valores inferiores priorizam a alternativa que minimiza os prejuízos associados à escolha.

Etapa 6: Defuzificar os valores de S_j , R_j e Q_j para cada uma das alternativas, conforme equação (31).

$$Crisp(S_j, R_j, Q_j) = \frac{(l + 2m + r)}{4} \quad (31)$$

Etapa 7: Classificar as alternativas em ordem crescente de S_j , R_j e Q_j .

Etapa 8: Definir a solução de compromisso, selecionando a alternativa com menor valor de Q_j . Esta solução é determinada desde que duas condições sejam satisfeitas:

C1 – Vantagem Aceitável, dada pela equação (32).

$$\left[\frac{(Q^{(A_2)} - Q^{(A_1)})}{(Q^{(A_j)} - Q^{(A_1)})} \right] \geq 1/(n - 1) \quad (32)$$

C2 – Estabilidade Aceitável: A alternativa A_1 deve ser a melhor classificada em relação a S_j e/ou R_j .

Se uma das condições não for satisfeita, um conjunto de soluções de compromisso deve ser proposta, a saber:

- Alternativas A_1 e A_2 se somente a condição C2 não é satisfeita;
- Alternativas A_1, A_2 e A_M , se a condição C1 não é satisfeita, com A_M , dado pela relação da equação (33).

$$Q^{(A_M)} - Q^{(A_1)} < 1/(n - 1) \quad (33)$$

Adota-se como solução de compromisso o conjunto de alternativas que satisfaça às condições C1 e C2, simultaneamente.

Com isso, são estabelecidas as soluções de compromisso com os interesses dos DMs consultados, tidos como especialistas de mercado, e podem ser admitidas em estudos iniciais e projetos básicos de pequenas usinas hidrelétricas (PCHs e CGHs), com o objetivo de acelerar o processo de pré-projeto, estabelecendo um bom nível de confiança em relação à alternativa adotada.

3.5 APLICAÇÃO DO MODELO DE PRÉ-SELEÇÃO

Na aplicação do modelo de pré-seleção de turbinas hidráulicas são abordados: a definição dos pesos dos critérios (seção 3.4.1) e a avaliação das alternativas (seção 3.4.2), ambos realizados por intermédio de especialistas e tidos como forma de contribuição para futuras aplicações, dentro das limitações descritas

nesta dissertação. Um estudo de caso é apresentado na seção 3.5.1, com o propósito de confrontar os resultados ao modelo.

3.5.1 Estudo de Caso

O estudo de caso proposto visa a avaliar um projeto, cujos dados de altura de queda e vazão estão compreendidos nos intervalos estabelecidos na seção 3.3. Trata-se de um projeto cujo potencial de implantação está localizado no estado do Rio Grande do Sul (RS), próximo à cidade de Santa Maria. O nome do projeto não é divulgado por solicitação do proprietário. O arranjo da usina em estudo será do tipo fio d'água. Os dados técnicos para estudo são: altura de queda bruta de 21 m; e vazão de 12 m³/s, com potência de aproveitamento disponível de 3270 kW.

No estudo de caso será utilizado o modelo de pré-seleção desenvolvido. Porém, não serão considerados os pesos dos critérios definidos na seção 4.1.2. Os pesos dos critérios serão determinados a partir da verificação das preferências do investidor, assessorado tecnicamente por um Engenheiro Mecânico que será responsável pela implantação, operação e manutenção da usina.

Assim, para coleta das preferências do investidor será utilizado o mesmo formulário aplicado na seção 4.1.2 e disponível no Apêndice A. Quanto às avaliações das alternativas, por sua vez, serão consideradas aquelas obtidas na seção 4.1.3, as quais foram atribuídas por especialistas. No estudo de caso também será abordada a verificação da estratégia de seleção (v) para os seguintes cenários: priorização dos benefícios ($v = 0,7$); minimização dos prejuízos relativos à escolha ($v = 0,3$) e priorização não declarada ($v = 0,5$). Com isso, é possível confrontar os resultados do modelo e desenvolver a discussão dos resultados obtidos.

É importante ressaltar que a aplicabilidade do modelo, tanto na consideração dos pesos dos critérios pelo especialista, quanto pelo investidor, somente poderá ser tomada quando os dados técnicos estejam compreendidos entre os limites especificados no item 3.3.

4 RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento do modelo de pré-seleção de turbinas hidráulicas. Os resultados são apresentados em duas seções: a primeira corresponde ao resultado do modelo de aplicação global; enquanto a segunda apresenta os resultados de um estudo de caso a partir do modelo construído, em que se submeteu ao investidor do empreendimento a determinação dos pesos dos critérios.

4.1 MODELO GLOBAL

O modelo de aplicação global é construído com o objetivo de oferecer ao interessado/usuário uma solução adequada à aplicação geral em caso de empreendimentos cujos dados técnicos de instalação estejam compreendidos nos intervalos estabelecidos no item 3.3.

4.1.1 Determinação dos Critérios da Pré-Seleção de Turbinas Hidráulicas

Depois de ler os artigos da base de dados, foi possível verificar a preocupação dos autores quanto às principais estruturas de uma usina hidrelétrica, principalmente quando consideradas nas análises de viabilidade de empreendimentos. Não somente em termos de estruturas, mas em termos do desempenho operacional (mecânico e hidráulico) dos equipamentos. Também são evidenciados os custos com operação e manutenção.

Dos autores consultados, destacam-se os trabalhos de Alexander e Giddens (2008), Ogayar e Vidal (2009), Singal, Saini e Raghuvanshi (2010), Mishra, Singal e Khatod (2011; 2012; 2013), Tuna (2013), Okot (2013), Gagliano *et al.* (2014), Loots *et al.* (2015), Ak, Kentel e Kucukali (2017), os quais são a base para a determinação dos critérios.

No entanto, devido não haver critérios claramente declarados, e sim vários pontos que remetem à tomada de atenção na seleção de turbinas e nos projetos de pequenas usinas hidrelétricas, optou-se por classificar em quatro grupos de critérios, os quais são: desempenho do equipamento; custos turbina-gerador; custos de equipamentos periféricos e custos com a construção civil. Cada grupo de critérios

contém quatro critérios alinhados ao referido grupo, perfazendo um total de dezesseis critérios de avaliação.

São apresentados cada grupo de critérios com os seus respectivos critérios sugeridos, com o objetivo de fundamentar a escolha.

4.1.1.1 *Grupo de Critérios de Desempenho*

O grupo de critérios de desempenho remete à capacidade de operação da turbina, atrelada à eficiência hidráulica e desempenho mecânico. Por exemplo, a eficiência operacional na relação altura de queda versus vazão nas condições de vazão nominal e vazões parciais é citada por Williamson, Stark e Booker (2014), Kaunda, Kimambo e Nielsen (2014), Elbatran *et al.* (2015b) e Kumar e Singal (2015a). Com isso, é possível transcrever as observações e estabelecer os critérios apresentados a seguir para este grupo.

Suportar maior variação de queda: Está intrínseco à capacidade de a turbina suportar maiores variações de queda, podendo melhor se adaptar entre as situações de secas e cheias, em decorrências da falta ou excesso de chuvas, respectivamente, sem comprometer drasticamente a eficiência do equipamento.

Suportar maior variação de vazão: Está vinculado às oscilações de precipitação e tem relação direta com a capacidade de operar em regime de carga parcial em função da baixa fluência em épocas de seca. Neste critério, manter a eficiência da turbina também é desejável.

Melhor curva de eficiência hidráulica: A eficiência global de uma usina está atrelada à eficiência entregue por seus equipamentos principais. No caso da turbina, a eficiência hidráulica (ou rendimento, como também é conhecido). Altos valores de eficiência disponíveis numa maior faixa de operação, desde potências parciais até a condição de plena carga, são preferíveis.

Disponibilidade para geração: Baixos índices de parada para manutenção aumentam a disponibilidade da planta. Isso reflete a necessidade de maior confiabilidade no equipamento turbina. Assim, turbinas com *design* otimizado, componentes padronizados, menor número de partes e facilidade de manutenção, contribuem para aumentar a disponibilidade para geração.

4.1.1.2 Grupo de Critérios de Custo da Turbina-Gerador

O grupo de critérios de custo da turbina-gerador inclui, efetivamente, os custos de aquisição, operação, manutenção e até custos de indisponibilidade dos referidos equipamentos, ou seja, custos da não produção de energia em função da parada de máquina. Os critérios são abordados individual ou coletivamente pelos autores Alexander e Giddens (2008), Chatzimouratidis e Pilavachi (2009), Elbatran *et al.* (2015a) e Katal e Fazelpour (2018).

Custo aquisição Turbina-Gerador: Juntos, turbina e gerador representam até 30% do custo do empreendimento, conforme Ogayar e Vidal (2009). O gerador é influenciado pelo tipo de turbina, em função da rotação ou velocidade de eixo. Maiores velocidades resultam em geradores menores. No entanto, o número de unidades geradoras pode ser otimizado segundo a capacidade de operação com cargas parciais, sendo esta condição satisfeita com o emprego de turbinas mais lentas.

Custo operação Turbina-Gerador: Para Singh e Singal (2015), uma usina tem operação adequada quando extrai o máximo de energia do potencial disponível e visa a custos operacionais mínimos, bem como mínimo impacto ambiental. Os custos de operação estão vinculados ao tamanho da estrutura, equipamentos e *layout* da planta. A flexibilização da turbina para operação em ranges parciais de potência é outro fator a ser considerado. Operações corretas reduzem os custos e o número de paradas para manutenção. Ou seja, os custos de produção de energia aumentam ao passo que os equipamentos principais evidenciam perda de eficiência.

Custo de Manutenção Turbina-Gerador: Amplamente explorado por Özcan, Ünlüsoy e Eren (2017), os autores chamam atenção para a necessidade de fornecimento de energia de forma eficiente e ininterrupta. Para tanto, é necessário dispor de equipamentos confiáveis na planta. Equipamentos maiores, com grande número de partes, sem modularidade de componentes e considerados de difícil manutenção, contribuem para o aumento dos custos de manutenção e indisponibilidade para geração.

Custo indisponibilidade Turbina-Gerador: Se refere ao custo da não geração, ou seja, o montante não faturado com a venda da energia gerada, em função de paradas para manutenção dos equipamentos principais ou redução da capacidade de operação em regimes parciais de carga. Além de atingir diretamente

os resultados da planta, afeta os indicadores de desempenho, podendo levar a usina a rever a garantia física em contratos de venda de energia.

4.1.1.3 *Grupo de Critérios de Custo de Equipamentos Periféricos*

Este grupo de critérios engloba os demais equipamentos eletromecânicos associados à usina hidrelétrica. Em sua maioria ditos como equipamentos secundários no processo de geração de energia elétrica, porém não menos importantes. Alguns, inclusive, vitais à segurança operacional do empreendimento. Alguns equipamentos são citados por Mishra, Singal e Kahtod (2012; 2013), Kaunda, Kimambo e Nielsen (2014) e Kumar e Singal (2015b) e elencados abaixo por meio de grupos de aplicação, sendo: equipamentos de levantamento, equipamentos hidromecânicos, Conduto Forçado e Sistemas Auxiliares.

Custo de aquisição dos Equipamentos de Levantamento: Pontes Rolantes, Pórticos e Monovias são os equipamentos comumente empregados em usinas hidrelétricas. São dispositivos necessários à operação e manutenção de componentes devido à capacidade de elevação de carga. Assim, o *layout* da planta, o peso dos componentes de turbina, gerador e hidromecânicos e as estratégias de Operação e Manutenção (O&M), têm impacto direto no tamanho e capacidade destes equipamentos. Estes equipamentos não são considerados pelos autores do portfólio apresentado, mas não podem ser desprezados pois representam significativo valor econômico.

Custo dos Equipamentos Hidromecânicos: Compreendem comportas, grades, válvulas de segurança e associados, ou seja, estruturas usadas no controle do reservatório e proteção dos equipamentos da casa de força. Zhou *et al.* (2014) contribuem informando que o tipo de turbina pode interferir nos sistemas hidromecânicos, cujos transitórios hidráulicos podem demandar de equipamentos mais robustos. Assim, as dimensões destes componentes tendem a variar segundo a turbina, o que faz crescer os custos, não só de aquisição, mas de O&M.

Custo do Conduto Forçado: O conduto forçado conduz a água da tomada até a turbina (KUMAR e SINGAL, 2015b). As dimensões do conduto forçado dependem basicamente do *layout* geral da usina e do tamanho e tipo de turbina, e tem sido considerado por grande parte dos autores do portfólio selecionado, em função dos custos de aquisição, instalação e manutenção.

Custo dos Sistemas Auxiliares: Conforme o tipo de turbina, alguns sistemas intrínsecos ao funcionamento do equipamento são necessários. São sistemas secundários à geração de energia, mas de vital importância para a operação e segurança da planta. Em suma, turbinas maiores demandam sistemas auxiliares mais robustos e com maiores possibilidades de monitoramento e controles.

4.1.1.4 *Grupo de Critérios de Custo da Construção Civil*

Este grupo de critério agrega os custos de construção relacionados às principais estruturas civis de uma usina, sob ótica dos custos de construção, como casa de força e barragem/tomada d'água. Para a edificação da casa de força, são considerados como principais custos a escavação do local, confecção da fundação, armadura e concretagens e a superestrutura, abrangendo fechamentos laterais, portões, coberturas, salas de operação, entre outros. Para a barragem, além do próprio represamento, são consideradas a tomada d'água e o vertedouro. Os principais autores que consideram tais estruturas são Singal e Saini (2008), Tuna (2013) e Garegnani *et al.* (2018).

Custo de Escavação da Casa de Força: A depender do tipo de turbina e da altura negativa de instalação da referida turbina em relação ao nível de jusante (NAj), em função dos requisitos de segurança à cavitação e submergência, uma maior escavação pode ser requerida, aumentando, assim, o custo para esta fase do projeto. O tamanho da turbina influencia em dimensões maiores da casa de força e, assim, pode demandar um maior volume de escavação.

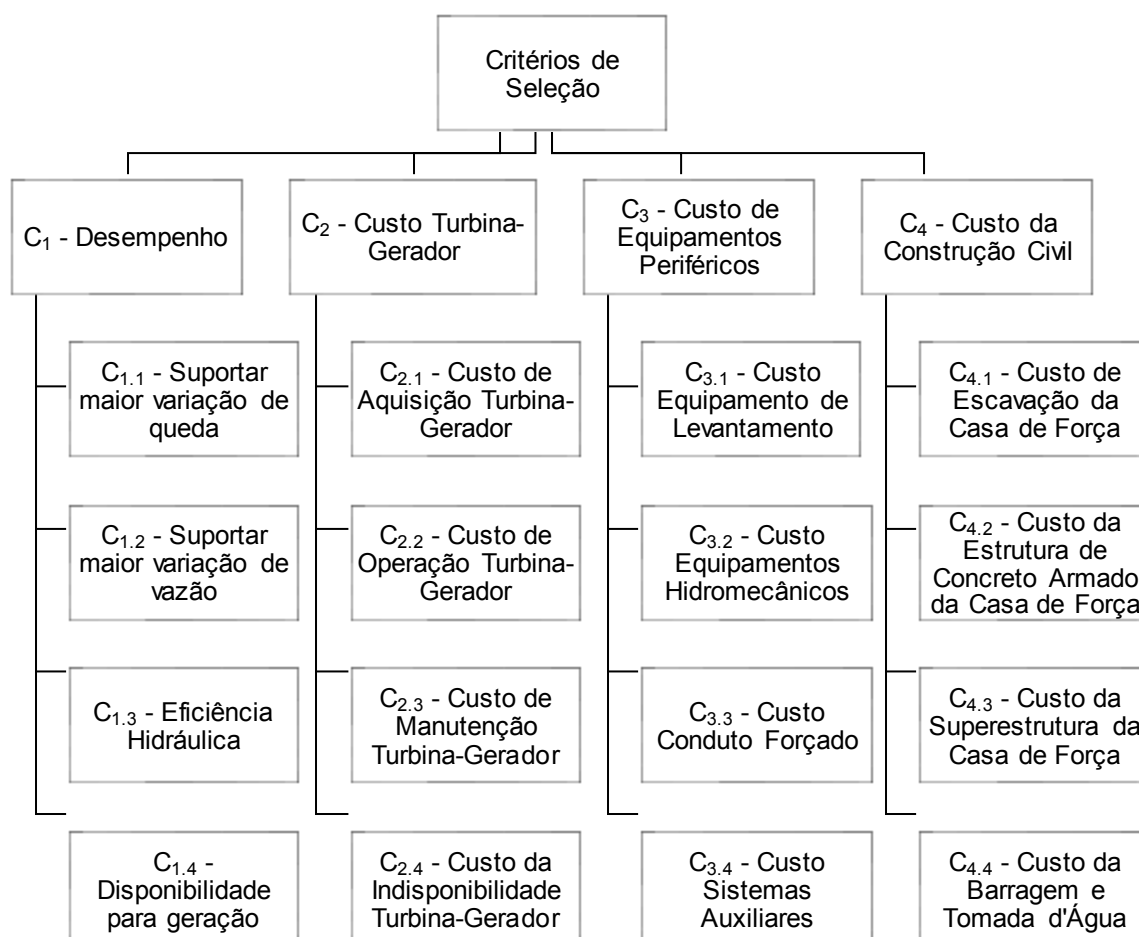
Custo da Estrutura de Concreto Armado da Casa de Força: O tipo e dimensões da turbina determinam o tamanho da casa força. Assim, a exemplo da necessidade de escavação, o volume de concreto armado necessário se dá sob esta função. Compreendem esta etapa do projeto toda a ferragem de armaduras e ancoragem e o respectivo volume de concreto utilizados na fundação e paredes estruturais.

Custo da Superestrutura da Casa de Força: Por consequência das dimensões da casa de força, capacidade da ponte rolante para movimentação de cargas, monovia para manobra das comportas da sucção e dimensões dos

equipamentos principais (turbina e gerador), a superestrutura tem variação proporcional ao seu tamanho.

Custo da Barragem e Tomada d'Água: Considerada uma das maiores estruturas de uma usina, a barragem responsável por represar a água que alimenta a turbina normalmente suporta o vertedouro e seus respectivos equipamentos mecânicos e auxiliares de acionamento. Em alguns casos, inclui também a tomada d'água e seus equipamentos. A tomada d'água tem ligação com o conduto forçado e precisa atender aos requisitos de suas dimensões. Quando não instalada na barragem, está alocada em estrutura isolada. A Figura 23 mostra a estrutura dos critérios e respectivos grupos.

Figura 23 - Grupos de Critérios



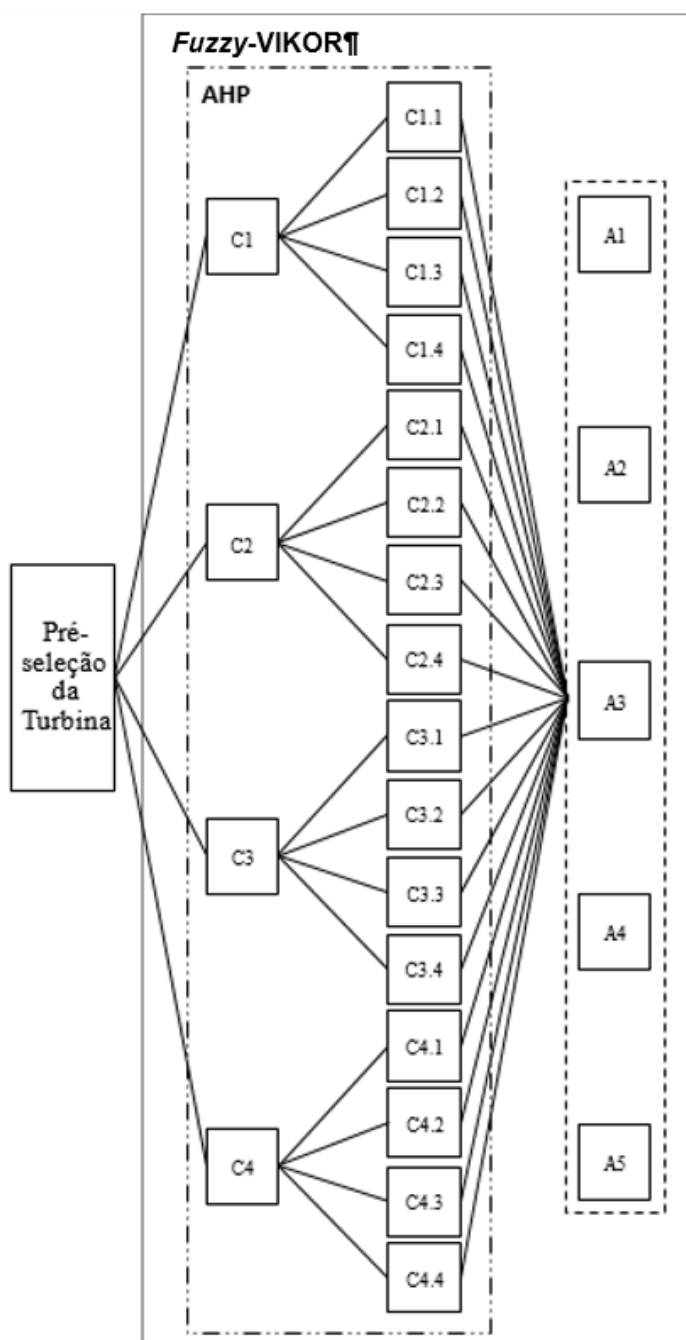
Fonte: O autor, 2019.

A partir dos critérios identificados e agrupados, é possível estruturar o modelo de análise proposto nesta dissertação. O modelo de pré-seleção de turbinas

hidráulicas pode ser visualizado na Figura 24. Em tese, os critérios, cujos pesos são resolvidos por meio do método AHP, são relacionados posteriormente com as alternativas selecionadas na seção 3.3, com aplicação de *Fuzzy-VIKOR*.

Como apresentado na Figura 24, as alternativas são identificadas pela letra “A”, sendo: FHS (A1); FHD (A2); FV (A3); KSM (A4) e KSJ (A5), e os critérios, pela letra “C”, conforme orientando na Figura 23.

Figura 24 - Modelo de pré-seleção de turbinas hidráulicas



Fonte: O autor, 2019.

4.1.2 Peso dos Critérios

Os critérios determinados na seção 4.1.1 abrangem diversas disciplinas das áreas das Engenharias Civil, Mecânica e Elétrica. Assim, com o objetivo de verificar a percepção de importância para cada critério, conforme cada uma das áreas integradas, um total de quatorze decisores (DMs) foram entrevistados. Destacam-se profissionais com larga experiência nas áreas de projeto e construção civil para pequenas usinas, fabricantes de equipamentos, gerentes de operação e manutenção de plantas, consultores técnicos e investidores.

O objetivo da técnica de entrevista com questionário, o qual foi enviado por *e-mail* aos participantes (formulário está disponível no Apêndice A), é de verificar as preferências entre critérios, segundo a observação de diversos pontos de vista envolvidos no processo de projeto, construção, operação e manutenção de uma pequena usina hidrelétrica. Depois de coletadas, as relações de preferências são computadas por meio do método AHP (conforme seção 3.4.1) e, assim, obtidas as prioridades.

Para considerar a discrepância de julgamentos na decisão de grupo, sem comprometer a propriedade de reciprocidade, foi utilizada a média geométrica dos pesos, como indicado na equação (20), seção 3.4.1. Assim, o peso dos critérios normalizados, a partir da decisão dos DMs, é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Peso dos critérios normalizados

| Peso Grupo de Critérios (GC) | Peso dos Critérios | Peso Global dos Critérios |
|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| C ₁ = 0,3224 | C ₁₁ = 0,0721 | C ₁₁ = 0,0232 |
| | C ₁₂ = 0,1913 | C ₁₂ = 0,0617 |
| | C ₁₃ = 0,3370 | C ₁₃ = 0,1086 |
| | C ₁₄ = 0,3997 | C ₁₄ = 0,1288 |
| C ₂ = 0,2302 | C ₂₁ = 0,2669 | C ₂₁ = 0,0782 |
| | C ₂₂ = 0,1847 | C ₂₂ = 0,0541 |
| | C ₂₃ = 0,1764 | C ₂₃ = 0,0517 |
| | C ₂₄ = 0,3720 | C ₂₄ = 0,1090 |
| C ₃ = 0,0738 | C ₃₁ = 0,1581 | C ₃₁ = 0,0149 |
| | C ₃₂ = 0,3074 | C ₃₂ = 0,0289 |
| | C ₃₃ = 0,3994 | C ₃₃ = 0,0375 |
| | C ₃₄ = 0,1351 | C ₃₄ = 0,0127 |

Continua

Continuação

| Peso Grupo de Critérios (GC) | Peso dos Critérios | Peso Global dos Critérios |
|-------------------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| C ₄ = 0,2283 | C ₄₁ = 0,1113 | C ₄₁ = 0,0324 |
| | C ₄₂ = 0,2544 | C ₄₂ = 0,0739 |
| | C ₄₃ = 0,1841 | C ₄₃ = 0,0535 |
| | C ₄₄ = 0,4502 | C ₄₄ = 0,1308 |

Fonte: O autor, 2019.

O peso global reflete a representatividade individual de cada critério no cenário de avaliação, enquanto o valor atribuído à normalização indica a participação dentro do referido grupo ao qual está inserido. Para os grupos C₁, C₂, C₃ e C₄, o valor da normalização, por si só, estabelece a importância de cada grupo frente aos demais. A soma dos valores de normalização dentro cada grupo é igual a um. Também é igual a um a soma única de todos os valores de peso global.

Considerando haver inconsistências nos julgamentos, apenas resultados de $HRC \leq 0,08$ (conforme equação (18)) foram tomados como válidos, onde a média dos valores de HRC para cada grupo são: para o grupo de critérios CG, $HRC = 0,054$; para critérios do grupo C₁, $HRC = 0,010$; o grupo C₂ apresentou $HRC = 0,043$; para C₃, $HRC = 0,008$; enquanto que para C₄, $HRC = 0,039$.

4.1.3 Desempenho das alternativas

Conforme descrito em 3.4.2, para julgamentos das alternativas em relação a cada um dos critérios, foram consultados quatro engenheiros de produto, especialistas em turbinas hidráulicas. As avaliações ocorreram de forma individualizada e os resultados são mostrados no Quadro 3. Estes julgamentos dispostos em variável linguística são transcritos em números *fuzzy* triangulares (conforme Tabela 3, da seção 3.4.2) para cálculo agregado ao método VIKOR.

Quadro 3 - Classificação *Fuzzy* para as alternativas em relação a cada critério

| | DM1 | | | | | DM2 | | | | | DM3 | | | | | DM4 | | | | |
|------|-----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|
| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 |
| C1.1 | P | P | P | G | G | MG | MP | M | VG | VG | MG | M | MG | M | M | M | MP | M | G | G |
| C1.2 | P | P | P | G | G | MP | P | MP | G | G | MP | MP | M | G | G | M | MP | M | G | G |
| C1.3 | MG | M | MG | G | G | MG | MP | MG | VG | VG | MG | M | MG | G | G | M | MP | M | G | G |
| C1.4 | G | G | G | G | G | MG | M | MG | G | G | M | M | MG | MG | MG | MG | MP | MP | G | G |
| C2.1 | MG | MG | G | MG | G | MG | MG | VG | MG | G | MP | M | G | G | VG | MP | M | MG | MG | G |
| C2.2 | P | P | MP | MP | MP | MP | MP | M | MG | MG | P | P | M | M | M | MP | M | M | MG | MG |
| C2.3 | MP | MP | MG | MG | M | MP | MP | MG | G | G | P | M | VG | G | G | MP | MG | M | G | G |
| C2.4 | MP | MP | G | G | M | MG | MG | G | VG | VG | MP | MP | MG | MG | MG | MP | M | G | MG | MG |
| C3.1 | M | M | VG | MG | MG | P | P | MG | M | MG | MP | M | G | MG | G | MP | M | MG | MG | G |
| C3.2 | MP | MP | MG | MG | M | MP | MP | M | MG | MG | M | M | G | G | G | MP | M | MG | G | G |
| C3.3 | P | MG | MP | P | P | P | MG | MG | M | M | MP | M | MG | M | M | MP | G | MP | P | P |
| C3.4 | P | P | MP | MP | P | MP | MP | M | MG | MG | P | P | M | M | M | P | MP | MP | M | M |
| C4.1 | M | M | G | G | M | M | MP | G | VG | G | M | M | G | G | G | MP | M | G | MG | MG |
| C4.2 | P | MP | MG | M | M | M | M | G | G | G | MP | M | VG | VG | VG | MP | MP | M | MG | MG |
| C4.3 | MP | MP | G | G | M | M | M | MG | MG | MG | MP | MP | VG | VG | VG | MP | M | G | MG | MG |
| C4.4 | MP | MP | M | MG | M | MP | MP | M | MG | MG | M | M | VG | G | VG | MP | MP | MG | MG | G |

Fonte: O autor, 2019.

4.1.4 Resultado da Solução Geral

A solução é dada a partir da aplicação do método *Fuzzy-VIKOR*, considerando os valores de pesos tomados na seção 4.1.2 e a avaliação das alternativas indicadas no Quadro 3. A sequência de cálculos demonstrados na seção 3.4.3 é reproduzida a seguir, suprimindo as equações e apontados os resultados diretos para cada passo de cálculo.

O passo 1 estabelece a necessidade de encontrar as funções que remetam aos valores máximos e mínimos para os critérios de benefício e custos, a partir das definições dos DMs, apontados no Quadro 3. A adequação para números *Fuzzy* é mostrada no Quadro 4. A identificação (+) representa a um critério de benefício, ao passo que (-) identifica um critério de custo, tomados como convenção geral.

Como se observa no Quadro 4, foram consultados quatro especialistas para julgamento de desempenho das alternativas em relação aos critérios. Logo, se faz necessário proceder a agregação de cada um dos julgamentos correspondentes. Para agregação utilizou-se de $minl_i$, $maxr_i$, e média geométrica para m_i , como informado em 3.4.3. Os valores correspondentes são transpostos no Quadro 5.

Quadro 4 - Avaliação das alternativas com número Fuzzy

| | Critérios | A1 | | | A2 | | | A3 | | | A4 | | | A5 | | |
|----------------------|----------------------|-------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | D1 | C _{1,1} (+) | 0,000 | 0,100 | 0,330 | 0,000 | 0,100 | 0,330 | 0,000 | 0,100 | 0,330 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 |
| C _{1,2} (+) | 0,000 | | 0,100 | 0,330 | 0,000 | 0,100 | 0,330 | 0,000 | 0,100 | 0,330 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| C _{1,3} (+) | 0,500 | | 0,670 | 0,830 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| C _{1,4} (+) | 0,670 | | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| C _{2,1} (-) | 0,500 | | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| C _{2,2} (-) | 0,000 | | 0,100 | 0,330 | 0,000 | 0,100 | 0,330 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 |
| C _{2,3} (-) | 0,170 | | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,330 | 0,500 | 0,670 |
| C _{2,4} (-) | 0,170 | | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,330 | 0,500 | 0,670 |
| C _{3,1} (-) | 0,330 | | 0,500 | 0,670 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 1,000 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 |
| C _{3,2} (-) | 0,170 | | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,330 | 0,500 | 0,670 |
| C _{3,3} (-) | 0,000 | | 0,100 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,000 | 0,100 | 0,330 | 0,000 | 0,100 | 0,330 |
| C _{3,4} (-) | 0,000 | | 0,100 | 0,330 | 0,000 | 0,100 | 0,330 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,000 | 0,100 | 0,330 |
| C _{4,1} (-) | 0,330 | | 0,500 | 0,670 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,330 | 0,500 | 0,670 |
| C _{4,2} (-) | 0,000 | | 0,100 | 0,330 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,330 | 0,500 | 0,670 |
| C _{4,3} (-) | 0,170 | | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,330 | 0,500 | 0,670 |
| C _{4,4} (-) | 0,170 | | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,330 | 0,500 | 0,670 |
| D2 | C _{1,1} (+) | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{1,2} (+) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,000 | 0,100 | 0,330 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{1,3} (+) | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,830 | 1,000 | 1,000 | 0,830 | 1,000 | 1,000 |
| | C _{1,4} (+) | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{2,1} (-) | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,830 | 1,000 | 1,000 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{2,2} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 |
| | C _{2,3} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{2,4} (-) | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,830 | 1,000 | 1,000 | 0,830 | 1,000 | 1,000 |
| | C _{3,1} (-) | 0,000 | 0,100 | 0,330 | 0,000 | 0,100 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,500 | 0,670 | 0,830 |
| | C _{3,2} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 |
| | C _{3,3} (-) | 0,000 | 0,100 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,330 | 0,500 | 0,670 |
| | C _{3,4} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 |
| | C _{4,1} (-) | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{4,2} (-) | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{4,3} (-) | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 |
| | C _{4,4} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |

Continua

Continuação

| | Critérios | A1 | | | A2 | | | A3 | | | A4 | | | A5 | | |
|----|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
| D3 | C _{1.1} (+) | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,330 | 0,500 | 0,670 |
| | C _{1.2} (+) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{1.3} (+) | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{1.4} (+) | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 |
| | C _{2.1} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,830 | 1,000 | 1,000 |
| | C _{2.2} (-) | 0,000 | 0,100 | 0,330 | 0,000 | 0,100 | 0,330 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,330 | 0,500 | 0,670 |
| | C _{2.3} (-) | 0,000 | 0,100 | 0,330 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{2.4} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 |
| | C _{3.1} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{3.2} (-) | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{3.3} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,330 | 0,500 | 0,670 |
| | C _{3.4} (-) | 0,000 | 0,100 | 0,330 | 0,000 | 0,100 | 0,330 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,330 | 0,500 | 0,670 |
| | C _{4.1} (-) | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{4.2} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 1,000 | 0,830 | 1,000 | 1,000 | 0,830 | 1,000 | 1,000 |
| | C _{4.3} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,830 | 1,000 | 1,000 | 0,830 | 1,000 | 1,000 | 0,830 | 1,000 | 1,000 |
| | C _{4.4} (-) | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,830 | 1,000 | 1,000 |
| D4 | C _{1.1} (+) | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{1.2} (+) | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{1.3} (+) | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{1.4} (+) | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{2.1} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{2.2} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 |
| | C _{2.3} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{2.4} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 |
| | C _{3.1} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{3.2} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C _{3.3} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,000 | 0,100 | 0,330 | 0,000 | 0,100 | 0,330 |
| | C _{3.4} (-) | 0,000 | 0,100 | 0,330 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,330 | 0,500 | 0,670 |
| | C _{4.1} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 |
| | C _{4.2} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 |
| | C _{4.3} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,330 | 0,500 | 0,670 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 |
| | C _{4.4} (-) | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,170 | 0,330 | 0,500 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,500 | 0,670 | 0,830 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |

Fonte: O autor, 2019.

Quadro 5 - Agregação dos julgamentos de desempenho das alternativas

| Agregação | Critérios | A1 | | | A2 | | | A3 | | | A4 | | | A5 | | |
|-----------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | l | m | r | l | m | r | l | m | r | l | m | r | l | m | r |
| | C1.1 (+) | 0,000 | 0,387 | 0,830 | 0,000 | 0,272 | 0,670 | 0,000 | 0,360 | 0,830 | 0,330 | 0,766 | 1,000 | 0,330 | 0,731 | 1,000 |
| | C1.2 (+) | 0,000 | 0,272 | 0,670 | 0,000 | 0,182 | 0,500 | 0,000 | 0,301 | 0,670 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| | C1.3 (+) | 0,330 | 0,623 | 0,830 | 0,170 | 0,406 | 0,670 | 0,330 | 0,623 | 0,830 | 0,670 | 0,870 | 1,000 | 0,670 | 0,870 | 1,000 |
| | C1.4 (+) | 0,330 | 0,657 | 1,000 | 0,170 | 0,512 | 1,000 | 0,170 | 0,592 | 1,000 | 0,500 | 0,787 | 1,000 | 0,500 | 0,787 | 1,000 |
| | C2.1 (-) | 0,170 | 0,470 | 0,830 | 0,330 | 0,579 | 0,830 | 0,500 | 0,824 | 1,000 | 0,500 | 0,707 | 1,000 | 0,670 | 0,870 | 1,000 |
| | C2.2 (-) | 0,000 | 0,182 | 0,500 | 0,000 | 0,202 | 0,670 | 0,170 | 0,451 | 0,670 | 0,170 | 0,522 | 0,830 | 0,170 | 0,522 | 0,830 |
| | C2.3 (-) | 0,000 | 0,245 | 0,500 | 0,170 | 0,437 | 0,830 | 0,330 | 0,688 | 1,000 | 0,500 | 0,787 | 1,000 | 0,330 | 0,731 | 1,000 |
| | C2.4 (-) | 0,170 | 0,394 | 0,830 | 0,170 | 0,437 | 0,830 | 0,500 | 0,787 | 1,000 | 0,500 | 0,781 | 1,000 | 0,330 | 0,688 | 1,000 |
| | C3.1 (-) | 0,000 | 0,272 | 0,670 | 0,000 | 0,334 | 0,670 | 0,500 | 0,781 | 1,000 | 0,330 | 0,623 | 0,830 | 0,500 | 0,746 | 1,000 |
| | C3.2 (-) | 0,170 | 0,366 | 0,670 | 0,170 | 0,406 | 0,670 | 0,330 | 0,657 | 1,000 | 0,500 | 0,746 | 1,000 | 0,330 | 0,693 | 1,000 |
| | C3.3 (-) | 0,000 | 0,182 | 0,500 | 0,330 | 0,657 | 1,000 | 0,170 | 0,470 | 0,830 | 0,000 | 0,224 | 0,670 | 0,000 | 0,224 | 0,670 |
| | C3.4 (-) | 0,000 | 0,135 | 0,500 | 0,000 | 0,182 | 0,500 | 0,170 | 0,406 | 0,670 | 0,170 | 0,485 | 0,830 | 0,000 | 0,360 | 0,830 |
| | C4.1 (-) | 0,170 | 0,451 | 0,670 | 0,170 | 0,451 | 0,670 | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,500 | 0,787 | 1,000 | 0,330 | 0,693 | 1,000 |
| | C4.2 (-) | 0,000 | 0,272 | 0,670 | 0,170 | 0,406 | 0,670 | 0,330 | 0,726 | 1,000 | 0,330 | 0,726 | 1,000 | 0,330 | 0,726 | 1,000 |
| | C4.3 (-) | 0,170 | 0,366 | 0,670 | 0,170 | 0,406 | 0,670 | 0,500 | 0,824 | 1,000 | 0,500 | 0,781 | 1,000 | 0,330 | 0,688 | 1,000 |
| | C4.4 (-) | 0,170 | 0,366 | 0,670 | 0,170 | 0,366 | 0,670 | 0,330 | 0,640 | 1,000 | 0,500 | 0,707 | 1,000 | 0,330 | 0,766 | 1,000 |

Fonte: O autor, 2019.

As distâncias d_i para cada uma das alternativas, identificadas de acordo com as equações (26) e (27), são compiladas no Quadro 6.

Quadro 6 - Distâncias d_i das alternativas

| Critérios | f^* | | | f | | |
|----------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | C_{1.1} (+) | 0,330 | 0,766 | 1,000 | 0,000 | 0,272 |
| C_{1.2} (+) | 0,670 | 0,830 | 1,000 | 0,000 | 0,182 | 0,500 |
| C_{1.3} (+) | 0,670 | 0,870 | 1,000 | 0,170 | 0,406 | 0,670 |
| C_{1.4} (+) | 0,500 | 0,787 | 1,000 | 0,170 | 0,512 | 1,000 |
| C_{2.1} (-) | 0,170 | 0,470 | 0,830 | 0,670 | 0,870 | 1,000 |
| C_{2.2} (-) | 0,000 | 0,182 | 0,500 | 0,170 | 0,522 | 0,830 |
| C_{2.3} (-) | 0,000 | 0,245 | 0,500 | 0,500 | 0,787 | 1,000 |
| C_{2.4} (-) | 0,170 | 0,394 | 0,830 | 0,500 | 0,787 | 1,000 |
| C_{3.1} (-) | 0,000 | 0,272 | 0,670 | 0,500 | 0,781 | 1,000 |
| C_{3.2} (-) | 0,170 | 0,366 | 0,670 | 0,500 | 0,746 | 1,000 |
| C_{3.3} (-) | 0,000 | 0,182 | 0,500 | 0,330 | 0,657 | 1,000 |
| C_{3.4} (-) | 0,000 | 0,135 | 0,500 | 0,170 | 0,485 | 0,830 |
| C_{4.1} (-) | 0,170 | 0,451 | 0,670 | 0,670 | 0,830 | 1,000 |
| C_{4.2} (-) | 0,000 | 0,272 | 0,670 | 0,330 | 0,726 | 1,000 |
| C_{4.3} (-) | 0,170 | 0,366 | 0,670 | 0,500 | 0,824 | 1,000 |
| C_{4.4} (-) | 0,170 | 0,366 | 0,670 | 0,500 | 0,766 | 1,000 |

Fonte: O autor, 2019.

Com os cálculos da etapa 2 do método *Fuzzy-VIKOR*, a partir da identificação das distâncias correspondentes a cada alternativa, é possível calcular os valores da soma ponderada difusa (S_j) e operador máximo *Fuzzy* (R_j) por meio da normalização ponderada da distância (d_i), a partir das equações (28) e (29). Os resultados compilados são apresentados no Quadro 7 e são provenientes da etapa 3.

Quadro 7 - Normalização ponderada de desempenho das alternativas com peso agregado

| Normalização Ponderada | Crítérios | A1 | | | A2 | | | A3 | | | A4 | | | A5 | | |
|------------------------|----------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|-------|
| | | l | m | r | l | m | r | l | m | r | l | m | r | l | m | r |
| | C _{1.1} (+) | -0,012 | 0,009 | 0,023 | -0,008 | 0,011 | 0,023 | -0,012 | 0,009 | 0,023 | -0,016 | 0,000 | 0,016 | -0,016 | 0,001 | 0,016 |
| | C _{1.2} (+) | 0,000 | 0,034 | 0,062 | 0,010 | 0,040 | 0,062 | 0,000 | 0,033 | 0,062 | -0,020 | 0,000 | 0,020 | -0,020 | 0,000 | 0,020 |
| | C _{1.3} (+) | -0,021 | 0,032 | 0,088 | 0,000 | 0,061 | 0,109 | -0,021 | 0,032 | 0,088 | -0,043 | 0,000 | 0,043 | -0,043 | 0,000 | 0,043 |
| | C _{1.4} (+) | -0,078 | 0,020 | 0,104 | -0,078 | 0,043 | 0,129 | -0,078 | 0,030 | 0,129 | -0,078 | 0,000 | 0,078 | -0,078 | 0,000 | 0,078 |
| | C _{2.1} (-) | -0,062 | 0,000 | 0,062 | -0,047 | 0,010 | 0,062 | -0,031 | 0,033 | 0,078 | -0,031 | 0,022 | 0,078 | -0,015 | 0,038 | 0,078 |
| | C _{2.2} (-) | -0,033 | 0,000 | 0,033 | -0,033 | 0,001 | 0,044 | -0,022 | 0,018 | 0,044 | -0,022 | 0,022 | 0,054 | -0,022 | 0,022 | 0,054 |
| | C _{2.3} (-) | -0,026 | 0,000 | 0,026 | -0,017 | 0,010 | 0,043 | -0,009 | 0,023 | 0,052 | 0,000 | 0,028 | 0,052 | -0,009 | 0,025 | 0,052 |
| | C _{2.4} (-) | -0,087 | 0,000 | 0,087 | -0,087 | 0,006 | 0,087 | -0,043 | 0,052 | 0,109 | -0,043 | 0,051 | 0,109 | -0,066 | 0,039 | 0,109 |
| | C _{3.1} (-) | -0,010 | 0,000 | 0,010 | -0,010 | 0,001 | 0,010 | -0,003 | 0,008 | 0,015 | -0,005 | 0,005 | 0,012 | -0,003 | 0,007 | 0,015 |
| | C _{3.2} (-) | -0,017 | 0,000 | 0,017 | -0,017 | 0,001 | 0,017 | -0,012 | 0,010 | 0,029 | -0,006 | 0,013 | 0,029 | -0,012 | 0,011 | 0,029 |
| | C _{3.3} (-) | -0,019 | 0,000 | 0,019 | -0,006 | 0,018 | 0,038 | -0,012 | 0,011 | 0,031 | -0,019 | 0,002 | 0,025 | -0,019 | 0,002 | 0,025 |
| | C _{3.4} (-) | -0,008 | 0,000 | 0,008 | -0,008 | 0,001 | 0,008 | -0,005 | 0,004 | 0,010 | -0,005 | 0,005 | 0,013 | -0,008 | 0,003 | 0,013 |
| | C _{4.1} (-) | -0,019 | 0,000 | 0,019 | -0,019 | 0,000 | 0,019 | 0,000 | 0,015 | 0,032 | -0,007 | 0,013 | 0,032 | -0,013 | 0,009 | 0,032 |
| | C _{4.2} (-) | -0,050 | 0,000 | 0,050 | -0,037 | 0,010 | 0,050 | -0,025 | 0,034 | 0,074 | -0,025 | 0,034 | 0,074 | -0,025 | 0,034 | 0,074 |
| C _{4.3} (-) | -0,032 | 0,000 | 0,032 | -0,032 | 0,003 | 0,032 | -0,011 | 0,030 | 0,054 | -0,011 | 0,027 | 0,054 | -0,022 | 0,021 | 0,054 | |
| C _{4.4} (-) | -0,079 | 0,000 | 0,079 | -0,079 | 0,000 | 0,079 | -0,054 | 0,043 | 0,131 | -0,027 | 0,054 | 0,131 | -0,054 | 0,063 | 0,131 | |
| S_j | -0,551 | 0,096 | 0,718 | -0,467 | 0,215 | 0,810 | -0,336 | 0,384 | 0,960 | -0,357 | 0,276 | 0,819 | -0,422 | 0,275 | 0,822 | |
| R_j | 0,000 | 0,034 | 0,104 | 0,010 | 0,061 | 0,129 | 0,000 | 0,052 | 0,131 | 0,000 | 0,054 | 0,131 | -0,003 | 0,063 | 0,131 | |

Fonte: O autor, 2019.

A etapa seguinte (etapa 4), visa a determinar os valores de S^*, S^-, R^*, R^- , a partir de S_j e R_j das alternativas, sendo: $S^* = \min_j S_j$, $S^- = \max_j S_j$, $R^* = \min_j R_j$ e $R^- = \max_j R_j$. Os valores são registrados no Quadro 8.

Quadro 8 - Valores máximos e mínimos de S^*, S^-, R^*, R^-

| | l | m | r |
|-------|--------|-------|-------|
| S^* | -0,551 | 0,096 | 0,718 |
| S^- | -0,336 | 0,384 | 0,960 |
| R^* | -0,003 | 0,034 | 0,104 |
| R^- | 0,010 | 0,063 | 0,131 |

Fonte: O autor, 2019.

Na etapa 5 do método VIKOR constam os valores de mérito *Fuzzy* (Q_j) para cada uma das alternativas, por meio da equação (30). O peso da estratégia (v) é adotado como 0,5, sem priorizar assim o maior benefício ou o menor prejuízo. Os valores correspondentes ao cálculo efetuado são compilados no Quadro 9.

Quadro 9 - Valores de mérito *Fuzzy* (Q_j)

| Q_j | Alternativa | l | m | r |
|-------|-------------|--------|-------|-------|
| | A1 | -0,810 | 0,000 | 0,819 |
| A2 | -0,743 | 0,138 | 0,943 | |
| A3 | -0,739 | 0,160 | 1,000 | |
| A4 | -0,746 | 0,132 | 0,954 | |
| A5 | -0,777 | 0,167 | 0,954 | |

Fonte: O autor, 2019.

Por seguinte, a etapa 6 busca defuzificar os valores de S_j , R_j e Q_j para cada uma das alternativas, conforme equação (31). Os valores calculados são anotados no Quadro 10.

Quadro 10 - Defuzificação

| Defuzificação | Alternativa | S_j | R_j | Q_j |
|---------------|-------------|-------|-------|-------|
| | A1 | 0,089 | 0,043 | 0,002 |
| A2 | 0,193 | 0,065 | 0,119 | |
| A3 | 0,348 | 0,059 | 0,145 | |
| A4 | 0,254 | 0,060 | 0,118 | |
| A5 | 0,237 | 0,064 | 0,128 | |

Fonte: O autor, 2019.

Para classificação das alternativas que compreende a etapa 7, em ordem crescente a partir de Q_j , a reordenação do Quadro 10 é mostrado no Quadro 11.

Quadro 11 - Classificação das alternativas

| Ordem | Alternativa | S_j | R_j | Q_j |
|-------|-------------|-------|-------|-------|
| 1 | A1 | 0,089 | 0,043 | 0,002 |
| 2 | A4 | 0,254 | 0,060 | 0,118 |
| 3 | A2 | 0,193 | 0,065 | 0,119 |
| 4 | A5 | 0,237 | 0,064 | 0,128 |
| 5 | A3 | 0,348 | 0,059 | 0,145 |

Fonte: O autor, 2019.

Por fim, testam-se vantagem (C1) e estabilidade (C2) aceitáveis, conforme equações (32) e (33), inseridas na etapa 8. Os valores são apresentados a seguir.

$$\left[\frac{(0,118 - 0,002)}{(0,145 - 0,002)} \right] \geq 1/(5 - 1)$$

C1 = [0,81], que é maior igual a 0,25.

Para C2, tanto S_j , quanto R_j são menores para A1 em relação A2. Assim, a alternativa 1 é a única solução para este caso.

A solução de compromisso apontada no modelo desenvolvido indica unicamente a aplicação da alternativa Francis Horizontal Simples (FHS) como solução de compromisso para os casos de conflito de variantes de turbinas, para as faixas de aplicação de altura de queda entre 20 e 35 m e vazões, de 10 a 30 m³/s.

A alternativa indicada, de fato, corresponde à variante de turbina hidráulica mais empregada nas pequenas usinas. Esta afirmação pode ser verificada em observação à Tabela 1, cujo levantamento se deu a partir dos dados fornecidos por um fabricante do ramo, líder de mercado no fornecimento destes equipamentos.

Pode-se justificar o fato observando os resultados de Q_j em *Fuzzy-VIKOR*, em que é nítido o distanciamento da alternativa A1 para as demais (ver Quadro 11). Isso se deve, basicamente, à associação dos critérios detentores dos maiores pesos corresponderem ao desempenho desta alternativa para o referido critério.

Com isso, e a partir do modelo estruturado desenvolvido, a solução apresentada pode ser aplicada nos casos reais de pré-seleção de turbina, em que os dados de projeto estejam enquadrados entre os limites especificados nesta dissertação, por considerar a opinião e julgamento dos especialistas entrevistados.

Em suma, é possível justificar a escolha da alternativa FHS como preferência de aplicação na elaboração de projetos básicos de pequenas usinas, sendo desnecessárias as verificações tradicionais, e sem prejuízo aparente da dúvida em relação à escolha.

4.2 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso consiste na aplicação do modelo de pré-seleção a um potencial hidrelétrico disponível na região sul do Brasil, conforme descrito na seção 3.5.1. Com o objetivo de verificar as preferências do investidor, assessorado tecnicamente por um Engenheiro Mecânico, o questionário disponível no Apêndice A foi utilizado, possibilitando, assim, determinar os pesos dos critérios.

Como na seção 4.1.2, os cálculos foram realizados por meio computacional, com a utilização do programa Microsoft Excel® e estão compilados na Tabela 5. Neste caso, em especial, a média geométrica calculada na equação (20) não é aplicada devido à existência de apenas um DM. A normalização também é dispensada por este motivo.

Tabela 5 - Peso dos critérios normalizados

| Peso Grupo de Critérios | Peso dos Critérios | Peso Global dos Critérios |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------|
| C ₁ = 0,0657 | C ₁₁ = 0,0639 | C ₁₁ = 0,0042 |
| | C ₁₂ = 0,1884 | C ₁₂ = 0,0124 |
| | C ₁₃ = 0,1793 | C ₁₃ = 0,0118 |
| | C ₁₄ = 0,5685 | C ₁₄ = 0,0374 |
| C ₂ = 0,2444 | C ₂₁ = 0,5562 | C ₂₁ = 0,1360 |
| | C ₂₂ = 0,0519 | C ₂₂ = 0,0127 |
| | C ₂₃ = 0,1217 | C ₂₃ = 0,0297 |
| | C ₂₄ = 0,2702 | C ₂₄ = 0,0660 |
| C ₃ = 0,1308 | C ₃₁ = 0,0633 | C ₃₁ = 0,0083 |
| | C ₃₂ = 0,5102 | C ₃₂ = 0,0667 |
| | C ₃₃ = 0,2761 | C ₃₃ = 0,0361 |
| | C ₃₄ = 0,1504 | C ₃₄ = 0,0197 |
| C ₄ = 0,5591 | C ₄₁ = 0,2761 | C ₄₁ = 0,1544 |
| | C ₄₂ = 0,1504 | C ₄₂ = 0,0841 |
| | C ₄₃ = 0,0633 | C ₄₃ = 0,0354 |
| | C ₄₄ = 0,5102 | C ₄₄ = 0,2852 |

Fonte: O autor, 2019.

Como em 4.1.2, o peso global reflete a representatividade individualmente de cada critério no conjunto de critérios para o cenário de avaliação, enquanto o valor atribuído indica participação dentro do referido grupo ao qual está inserido. Para os grupos C₁, C₂, C₃ e C₄, o valor da nota, por si só, estabelece a importância de cada grupo frente aos demais. A soma dos valores de nota dentro cada grupo é igual a um. Também é igual a um a soma única de todos os valores de peso global.

A Razão da Consistência Harmônica (HCR) obtida neste julgamento, diferentemente do indicado na seção 4.1.2, não indica a necessidade de efetuar a média entre julgamentos consistentes, uma vez que foi tomado apenas um julgamento. Assim, a razão de consistência, dada pela equação (18), foi aplicada integralmente, retornando para GC um HRC = 0,079. Para critérios do grupo C₁, HRC = 0,057; em C₂, HRC = 0,079; para C₃, HRC = 0,062; e para C₄, HRC = 0,062.

Como informado, o desempenho das alternativas não é verificado no estudo de caso, sendo aproveitada a opinião de especialistas em turbinas hidráulicas, cujo julgamento é reportado em 4.1.3. Também é aproveitada parte da computação do método *Fuzzy*-VIKOR da seção anterior, no que se refere aos Quadro 4, 5 e Quadro 6 da seção 4.1.4, finalizando, assim, as etapas 2 e 3 do cálculo. Os resultados são compilados no Quadro 12.

Quadro 12 - Normalização ponderada de desempenho das alternativas com peso agregado – Estudo de Caso

| Normalização Ponderada | Critérios | A1 | | | A2 | | | A3 | | | A4 | | | A5 | | |
|------------------------|----------------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| | | l | m | r | l | m | r | l | m | r | l | m | r | l | m | r |
| | C _{1.1} (+) | -0,002 | 0,002 | 0,004 | -0,001 | 0,002 | 0,004 | -0,002 | 0,002 | 0,004 | -0,003 | 0,000 | 0,003 | -0,003 | 0,000 | 0,003 |
| | C _{1.2} (+) | 0,000 | 0,007 | 0,012 | 0,002 | 0,008 | 0,012 | 0,000 | 0,007 | 0,012 | -0,004 | 0,000 | 0,004 | -0,004 | 0,000 | 0,004 |
| | C _{1.3} (+) | -0,002 | 0,004 | 0,010 | 0,000 | 0,007 | 0,012 | -0,002 | 0,004 | 0,010 | -0,005 | 0,000 | 0,005 | -0,005 | 0,000 | 0,005 |
| | C _{1.4} (+) | -0,023 | 0,006 | 0,030 | -0,023 | 0,012 | 0,037 | -0,023 | 0,009 | 0,037 | -0,023 | 0,000 | 0,023 | -0,023 | 0,000 | 0,023 |
| | C _{2.1} (-) | -0,108 | 0,000 | 0,108 | -0,082 | 0,018 | 0,108 | -0,054 | 0,058 | 0,136 | -0,054 | 0,039 | 0,136 | -0,026 | 0,065 | 0,136 |
| | C _{2.2} (-) | -0,008 | 0,000 | 0,008 | -0,008 | 0,000 | 0,010 | -0,005 | 0,004 | 0,010 | -0,005 | 0,005 | 0,013 | -0,005 | 0,005 | 0,013 |
| | C _{2.3} (-) | -0,015 | 0,000 | 0,015 | -0,010 | 0,006 | 0,025 | -0,005 | 0,013 | 0,030 | 0,000 | 0,016 | 0,030 | -0,005 | 0,014 | 0,030 |
| | C _{2.4} (-) | -0,053 | 0,000 | 0,053 | -0,053 | 0,003 | 0,053 | -0,026 | 0,031 | 0,066 | -0,026 | 0,031 | 0,066 | -0,040 | 0,023 | 0,066 |
| | C _{3.1} (-) | -0,006 | 0,000 | 0,006 | -0,006 | 0,001 | 0,006 | -0,001 | 0,004 | 0,008 | -0,003 | 0,003 | 0,007 | -0,001 | 0,004 | 0,008 |
| | C _{3.2} (-) | -0,040 | 0,000 | 0,040 | -0,040 | 0,003 | 0,040 | -0,027 | 0,023 | 0,067 | -0,014 | 0,031 | 0,067 | -0,027 | 0,026 | 0,067 |
| | C _{3.3} (-) | -0,018 | 0,000 | 0,018 | -0,006 | 0,017 | 0,036 | -0,012 | 0,010 | 0,030 | -0,018 | 0,002 | 0,024 | -0,018 | 0,002 | 0,024 |
| | C _{3.4} (-) | -0,012 | 0,000 | 0,012 | -0,012 | 0,001 | 0,012 | -0,008 | 0,006 | 0,016 | -0,008 | 0,008 | 0,020 | -0,012 | 0,005 | 0,020 |
| | C _{4.1} (-) | -0,093 | 0,000 | 0,093 | -0,093 | 0,000 | 0,093 | 0,000 | 0,071 | 0,154 | -0,032 | 0,063 | 0,154 | -0,063 | 0,045 | 0,154 |
| | C _{4.2} (-) | -0,056 | 0,000 | 0,056 | -0,042 | 0,011 | 0,056 | -0,029 | 0,038 | 0,084 | -0,029 | 0,038 | 0,084 | -0,029 | 0,038 | 0,084 |
| | C _{4.3} (-) | -0,021 | 0,000 | 0,021 | -0,021 | 0,002 | 0,021 | -0,007 | 0,020 | 0,035 | -0,007 | 0,018 | 0,035 | -0,014 | 0,014 | 0,035 |
| | C _{4.4} (-) | -0,172 | 0,000 | 0,172 | -0,172 | 0,000 | 0,172 | -0,117 | 0,094 | 0,285 | -0,058 | 0,117 | 0,285 | -0,117 | 0,137 | 0,285 |
| | Sj | -0,628 | 0,018 | 0,657 | -0,566 | 0,091 | 0,697 | -0,318 | 0,394 | 0,985 | -0,288 | 0,370 | 0,955 | -0,392 | 0,380 | 0,956 |
| | Rj | 0,000 | 0,007 | 0,172 | 0,002 | 0,018 | 0,172 | 0,000 | 0,094 | 0,285 | 0,000 | 0,117 | 0,285 | -0,001 | 0,137 | 0,285 |

Fonte: O autor, 2019.

A sequência de cálculos corresponde ao estabelecido na seção 4.1.4, a partir da etapa 4. Os valores de S^* , S^- , R^* , R^- correspondentes, a partir de S_j e R_j das alternativas, são registrados no Quadro 13.

Quadro 13 - Valores máximos e mínimos de S^* , S^- , R^* , R^- – Estudo de Caso.

| | l | m | r |
|-------|--------|-------|-------|
| S^* | -0,628 | 0,018 | 0,657 |
| S^- | -0,288 | 0,394 | 0,985 |
| R^* | -0,001 | 0,007 | 0,172 |
| R^- | 0,002 | 0,137 | 0,285 |

Fonte: O autor, 2019.

A verificação dos valores de mérito *Fuzzy* (Q_j), para cada uma das alternativas, foi realizada para três cenários distintos de decisão: a de neutralidade quanto à preferência pelos benefícios associados à decisão ou minimização dos prejuízos associados à escolha ($v=0,5$); o cenário de priorização dos benefícios associados à decisão ($v=0,7$); e o cenário de minimização dos prejuízos associados à escolha ($v=0,3$).

4.2.1 Cenário 1 – Neutralidade da Preferência

Para a verificação dos valores de mérito *Fuzzy* (Q_j) para cada uma das alternativas, na etapa 5, o peso da estratégia (v) é adotado como 0,5, denotando igual importância, sem priorizar o maior benefício ou o menor prejuízo. Os valores calculados são mostrados no Quadro 14.

Quadro 14 - Valores de mérito *Fuzzy* (Q_j) – Estudo de Caso – Cenário 1

| Q_j | Alternativa | l | m | r |
|-------|-------------|--------|-------|-------|
| | A1 | -0,698 | 0,000 | 0,701 |
| A2 | -0,675 | 0,042 | 0,713 | |
| A3 | -0,602 | 0,268 | 1,000 | |
| A4 | -0,593 | 0,301 | 0,991 | |
| A5 | -0,627 | 0,340 | 0,991 | |

Fonte: O autor, 2019.

Os valores de S_j , R_j e Q_j , defuzificados, para cada uma das alternativas, conforme a etapa 6, são demonstrados no Quadro 15.

Quadro 15 - Defuzificação – Estudo de Caso – Cenário 1

| Defuzificação | Alternativa | S_j | R_j | Q_j |
|---------------|-------------|-------|-------|-------|
| | A1 | 0,016 | 0,046 | 0,001 |
| | A2 | 0,079 | 0,052 | 0,030 |
| | A3 | 0,364 | 0,118 | 0,234 |
| | A4 | 0,352 | 0,130 | 0,250 |
| | A5 | 0,331 | 0,140 | 0,261 |

Fonte: O autor, 2019.

Em observação ao Quadro 15 é possível identificar que a classificação das alternativas em ordem crescente, a partir de Q_j , já é atendida, não necessitando de uma reordenação. Logo, tal passo pode ser suprimido neste caso.

Por fim, testam-se vantagem (C1) e estabilidade (C2) aceitáveis, contidas na etapa 8. Os valores são apresentados a seguir.

$$\left[\frac{(0,03 - 0,001)}{(0,261 - 0,001)} \right] \geq 1/(5 - 1)$$

$C1 = [0,1115]$ não é maior nem igual a 0,25. Logo, condição não satisfeita. Ou seja, a alternativa A1, isoladamente, não satisfaz à condição de solução de compromisso.

Assim, avalia-se a inclusão da alternativa A2 em atendimento à solução. Calcula-se novamente C1, a partir de Q_j correspondente:

$$\left[\frac{(0,234 - 0,03)}{(0,261 - 0,03)} \right] \geq 1/(5 - 1)$$

$C1 = [0,8831]$ é maior ou igual a 0,25, o que satisfaz a condição desejada. Nisso, pode-se calcular C2:

Para C2, tanto S_j quanto R_j são menores para a alternativa A2 do que para a alternativa A3.

Assim, as alternativas A1 e A2 são dadas como solução de compromisso.

O cálculo anterior mostra a solução de compromisso para a situação de não preferência, seja para a priorização de benefícios ou minimização dos prejuízos. Na sequência, são avaliados os dois cenários citados, alterando o valor de v , sendo:

priorização dos benefícios ($v = 0,7$) e minimização dos prejuízos relativos à escolha ($v = 0,3$).

4.2.2 Cenário 2 – Priorização dos Benefícios

Valores de mérito Fuzzy (Q_j) calculados para o peso da estratégia de priorização dos benefícios associados à decisão ($v = 0,7$) são mostrados no Quadro 16.

Quadro 16 - Valores de mérito Fuzzy (Q_j) – Estudo de Caso – Cenário 2

| Q_j | Alternativa | l | m | r |
|-------|-------------|--------|-------|-------|
| | A1 | -0,738 | 0,000 | 0,739 |
| | A2 | -0,708 | 0,043 | 0,756 |
| | A3 | -0,603 | 0,254 | 1,000 |
| | A4 | -0,590 | 0,268 | 0,987 |
| | A5 | -0,637 | 0,294 | 0,987 |

Fonte: O autor, 2019.

Os valores de S_j , R_j e Q_j , defuzificados, estão no Quadro 17.

Quadro 17 - Defuzificação – Estudo de Caso – Cenário 2

| Defuzificação | Alternativa | S_j | R_j | Q_j |
|---------------|-------------|-------|-------|-------|
| | A1 | 0,016 | 0,046 | 0,000 |
| | A2 | 0,079 | 0,052 | 0,034 |
| | A3 | 0,364 | 0,118 | 0,226 |
| | A4 | 0,352 | 0,130 | 0,233 |
| | A5 | 0,331 | 0,140 | 0,235 |

Fonte: O autor, 2019.

Tal qual o Quadro 15, no Quadro 17 a classificação das alternativas em ordem crescente a partir de Q_j , já é atendida, não necessitando de reordenação.

A vantagem (C1) e estabilidade (C2) aceitáveis da alternativa A1 frente à A2 são calculadas:

$$\left[\frac{(0,034 - 0,000)}{(0,235 - 0,000)} \right] \geq 1/(5 - 1)$$

C1 = [0,1447] não é maior nem igual à 0,25. Logo, condição não satisfeita.

Calculando a vantagem C1 de A2 em comparação à A3, tem-se:

$$\left[\frac{(0,226 - 0,034)}{(0,235 - 0,034)} \right] \geq 1/(5 - 1)$$

$C1 = [0,9552]$ é maior ou igual à 0,25, o que remete à condição satisfeita.

A estabilidade C2 é verificada no Quadro 17 quando tanto S_j , quanto R_j são menores para A2 em relação A3. Assim, a solução de compromisso é apontada como as alternativas Francis Horizontal Simples (FHS) e Francis Horizontal Dupla (FHD), respectivamente.

4.2.3 Cenário 3 – Minimização dos Prejuízos

Como visto até aqui, a sistemática de cálculo e avaliação não muda entre as estratégias definidas. Com isso, toma-se como base o processo anterior, adequando os valores para a computação correspondente à $v = 0,3$.

Valores de mérito *Fuzzy* (Q_j), calculados para o peso da estratégia de minimização dos prejuízos, são mostrados no Quadro 18.

Quadro 18 - Valores de mérito *Fuzzy*(Q_j) – Estudo de Caso – Cenário 3

| Q_j | Alternativa | l | m | r |
|-------|-------------|--------|-------|-------|
| | A1 | -0,659 | 0,000 | 0,662 |
| | A2 | -0,642 | 0,040 | 0,670 |
| | A3 | -0,601 | 0,283 | 1,000 |
| | A4 | -0,595 | 0,334 | 0,994 |
| | A5 | -0,618 | 0,386 | 0,995 |

Fonte: O autor, 2019.

Os valores de S_j , R_j e Q_j , defuzificados, estão no Quadro 19.

Quadro 19 - Defuzificação – Estudo de Caso – Cenário 3

| Defuzificação | Alternativa | S_j | R_j | Q_j |
|---------------|-------------|-------|-------|-------|
| | A1 | 0,016 | 0,046 | 0,001 |
| | A2 | 0,079 | 0,052 | 0,027 |
| | A3 | 0,364 | 0,118 | 0,241 |
| | A4 | 0,352 | 0,130 | 0,267 |
| | A5 | 0,331 | 0,140 | 0,287 |

Fonte: O autor, 2019.

Como ocorrido anteriormente, a classificação das alternativas em ordem crescente, a partir de Q_j , já é atendida, não necessitando de reordenação.

A vantagem (C1) e estabilidade (C2) aceitáveis da alternativa A1 frente à A2 são calculadas:

$$\left[\frac{(0,027 - 0,001)}{(0,287 - 0,001)} \right] \geq 1/(5 - 1)$$

$C1 = [0,0909]$ não é maior nem igual à 0,25. Logo, condição não satisfeita.

Calculando a vantagem C1 de A2 em comparação à A3, tem-se:

$$\left[\frac{(0,241 - 0,027)}{(0,287 - 0,027)} \right] \geq 1/(5 - 1)$$

$C1 = [0,8231]$ é maior ou igual à 0,25, o que remete à condição satisfeita.

A estabilidade C2 é verificada no Quadro 19, quando, tanto S_j , quanto R_j são menores para A2 em relação à A3. Logo, neste cenário, a solução de compromisso também é dada pelas alternativas Francis Horizontal Simples (FHS) e Francis Horizontal Dupla (FHD), respectivamente.

Para o estudo de caso, em que as avaliações dos critérios foram obtidas a partir das preferências do investidor, a solução de compromisso apontada como resposta ao modelo estruturado de pré-seleção indica as alternativas FHS e FHD como adequadas para qualquer cenário ou estratégia admitida.

As variantes de turbinas apontadas como solução também aqui figuram entre as mais utilizadas em pequenas usinas, para as faixas de aplicação estipuladas segundo dados técnicos, conforme a Tabela 1, o que denota total consonância com a prática.

O fato de a alternativa FHD ser incluída à solução de compromisso pode ser atribuído diretamente aos pesos definidos pelo investidor e ao desempenho da alternativa. Se comparados os pesos resultantes da avaliação dos especialistas frente às preferências do investidor, os critérios que se sobressaíram para o investidor estão alinhados aos critérios cuja alternativa FHD obteve similar ou até melhor desempenho quando comparada à alternativa FHS.

A Tabela 6 mostra o comparativo de pesos de critérios, sendo destacados os campos cujos pesos resultantes da preferência do investidor são maiores que aqueles oriundos do julgamento dos especialistas.

Tabela 6 - Comparativo de peso dos critérios

| Critério | Peso Global Especialistas | Peso Global Investidor |
|-----------------|----------------------------------|-------------------------------|
| C1.1 | 0,0232 | 0,0042 |
| C1.2 | 0,0617 | 0,0124 |
| C1.3 | 0,1086 | 0,0118 |
| C1.4 | 0,1288 | 0,0374 |
| C2.1 | 0,0782 | 0,1360 |
| C2.2 | 0,0541 | 0,0127 |
| C2.3 | 0,0517 | 0,0297 |
| C2.4 | 0,1090 | 0,0660 |
| C3.1 | 0,0149 | 0,0083 |
| C3.2 | 0,0289 | 0,0667 |
| C3.3 | 0,0375 | 0,0361 |
| C3.4 | 0,0127 | 0,0197 |
| C4.1 | 0,0324 | 0,1544 |
| C4.2 | 0,0739 | 0,0841 |
| C4.3 | 0,0535 | 0,0354 |
| C4.4 | 0,1308 | 0,2852 |

Fonte: O autor, 2019.

A comparação do desempenho da alternativa, segundo a classificação *fuzzy* associada, pode ser vista na Tabela 7, que reproduz, na íntegra, os julgamentos admitidos pelos especialistas de turbinas, demonstrados anteriormente na Tabela 6. O objetivo aqui é destacar os melhores desempenhos de A2 em relação à A1.

A escolha da alternativa a ser utilizada, nesta ocasião, por consenso do time de Engenharia do investidor, foi a alternativa A1, dado critério técnico de melhor aproveitamento da série de vazões históricas. No entanto, tal escolha será validada

na fase de projeto executivo, a partir da avaliação detalhada de indicadores financeiros, como o retorno sobre o capital investido.

Tabela 7 - Comparativo da Classificação *Fuzzy* para as alternativas A1 e A2.

| Critério | DM1 | | DM2 | | DM3 | | DM4 | |
|----------|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|
| | A1 | A2 | A1 | A2 | A1 | A2 | A1 | A2 |
| C1.1 | P | P | MG | MP | MG | M | M | MP |
| C1.2 | P | P | MP | P | MP | MP | M | MP |
| C1.3 | MG | M | MG | MP | MG | M | M | MP |
| C1.4 | G | G | MG | M | M | M | MG | MP |
| C2.1 | MG | MG | MG | MG | MP | M | MP | M |
| C2.2 | P | P | MP | MP | P | P | MP | M |
| C2.3 | MP | MP | MP | MP | P | M | MP | MG |
| C2.4 | MP | MP | MG | MG | MP | MP | MP | M |
| C3.1 | M | M | P | P | MP | M | MP | M |
| C3.2 | MP | MP | MP | MP | M | M | MP | M |
| C3.3 | P | MG | P | MG | MP | M | MP | G |
| C3.4 | P | P | MP | MP | P | P | P | MP |
| C4.1 | M | M | M | MP | M | M | MP | M |
| C4.2 | P | MP | M | M | MP | M | MP | MP |
| C4.3 | MP | MP | M | M | MP | MP | MP | M |
| C4.4 | MP | MP | MP | MP | M | M | MP | MP |

Fonte: O autor, 2019.

5 CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento de um modelo de pré-seleção de turbinas hidráulicas por meio de uma abordagem multicritério, utilizando os métodos AHP e *Fuzzy*-VIKOR, em situações em que os dados técnicos de altura de queda e vazão, disponíveis para instalação do empreendimento, e que representem conflito na escolha das configurações existentes, pode-se inferir diversos pontos conclusivos a respeito da dissertação.

Foram apresentados novos critérios de seleção de turbinas hidráulicas na etapa de pré-seleção por meio de um método de pesquisa estruturado em consulta à literatura disponível. Os grupos de critérios propostos foram:

O grupo de critério Desempenho (C_1), o qual contempla os seguintes critérios: suportar maior variação de queda (C_{11}), suportar maior variação de vazão (C_{12}), melhor curva de eficiência hidráulica (C_{13}) e disponibilidade para geração (C_{14}).

O grupo de critérios Custo Turbina-Gerador (C_2), que abrange: custo de aquisição turbina-gerador (C_{21}), custo de operação turbina-gerador (C_{22}), custo de manutenção turbina-gerador (C_{23}) e custo da indisponibilidade turbina-gerador (C_{24}).

O grupo de critérios Custo de Equipamentos Periféricos (C_3), quem contém os seguintes critérios: custo equipamento de levantamento (C_{31}), custo equipamentos hidromecânicos (C_{32}), custo conduto forçado (C_{33}) e custo sistemas auxiliares (C_{34}).

O grupo de critérios Custo da Construção Civil (C_4), que engloba os seguintes critérios: custo de escavação da casa de força (C_{41}), custo da estrutura de concreto armado da casa de força (C_{42}), custo da superestrutura da casa de força (C_{43}) e custo da barragem e tomada d'água (C_{44}).

Para a construção do modelo, foram utilizados os métodos AHP, para definição da importância dos critérios (pesos), a partir das avaliações de especialistas em empreendimentos hidrelétricos; e o método *Fuzzy*-VIKOR, para classificação das alternativas a partir dos julgamentos dos especialistas no que se refere ao desempenho das turbinas hidráulicas em relação aos critérios.

Os resultados do método AHP foram considerados válidos apenas para os julgamentos dos especialistas cuja Razão de Consistência Harmônica (HRC) apresentaram resultado menor ou igual a 0,08, conforme indicado por Stein e Mizzi (2007). A média aritmética dos valores válidos de HRC para o grupo de critérios foi: HRC = 0,054, para a relação entre grupos; para critérios do grupo C_1 , HRC = 0,010;

o grupo C_2 apresentou $HRC = 0,043$; para o grupo C_3 , $HRC = 0,008$; enquanto que para o grupo C_4 , $HRC = 0,039$. Os resultados apresentados pelo HRC dos especialistas atende ao requisito de julgamento consistente. Os valores da importância dos critérios (pesos) determinados a partir do método AHP foram: $C_1 = 0,3224$; $C_2 = 0,2302$; $C_3 = 0,0738$ e $C_4 = 0,2283$. Os valores da importância global para os dezesseis critérios (pesos globais) determinados a partir da aplicação do método AHP para cada grupo de critérios em relação ao peso do grupo foram: $C_{11} = 0,0232$; $C_{12} = 0,0617$; $C_{13} = 0,1086$; $C_{14} = 0,1288$; $C_{21} = 0,0782$; $C_{22} = 0,0541$; $C_{23} = 0,0517$; $C_{24} = 0,1090$; $C_{31} = 0,0149$; $C_{32} = 0,0289$; $C_{33} = 0,0375$; $C_{34} = 0,0127$; $C_{41} = 0,0324$; $C_{42} = 0,0739$; $C_{43} = 0,0535$ e $C_{44} = 0,1308$.

Os resultados da aplicação do modelo são para uma solução geral, cujo resultado poderá ser replicado em situações práticas de conflito entre alternativas, para a faixa de dados técnicos destacados na seção 3.3. O resultado para essa situação, fornecido pelo método *Fuzzy-VIKOR*, apresentou a seguinte solução: $A_1 > A_4 > A_2 > A_5 > A_3$. Com base na avaliação dos indicadores de vantagem aceitável e estabilidade aceitável do método *Fuzzy-VIKOR*, apenas a alternativa A_1 - Francis Horizontal Simples (FHS) é aceita como solução de compromisso única da pré-seleção.

No estudo de caso, a importância dos critérios (pesos) foi definida a partir das preferências do investidor do empreendimento. Os resultados da consistência para o grupo de critérios, com base nos julgamentos realizados pelo investidor, foram: o $HRC = 0,079$, para a relação entre grupos; para o grupo C_1 , $HRC = 0,057$; no grupo C_2 , $HRC = 0,079$; para o grupo C_3 , $HRC = 0,062$ e para o grupo C_4 , $HRC = 0,062$. Os valores da importância global para os dezesseis critérios (pesos globais) determinados a partir da aplicação do método AHP, realizados pelo investidor, foram: $C_1 = 0,0657$; $C_2 = 0,2444$; $C_3 = 0,1308$ e $C_4 = 0,5591$. Em termos de peso global: $C_{11} = 0,0042$; $C_{12} = 0,0124$; $C_{13} = 0,0118$; $C_{14} = 0,0374$; $C_{21} = 0,1360$; $C_{22} = 0,0127$; $C_{23} = 0,0297$, $C_{24} = 0,0660$, $C_{31} = 0,0083$, $C_{32} = 0,0667$, $C_{33} = 0,0361$, $C_{34} = 0,0197$, $C_{41} = 0,1544$; $C_{42} = 0,0841$; $C_{43} = 0,0354$ e $C_{44} = 0,2852$.

Quanto aos resultados da importância para os grupos de critérios fornecidos pelos especialistas, em relação aos resultados obtidos a partir dos julgamentos do investidor, se observa uma preferência declarada do investidor pelo menor custo com a construção civil. Na avaliação dos especialistas, esse grupo de critérios

aparece em terceiro lugar. Para os especialistas, o grupo de critérios com maior importância foi o grupo de Desempenho (C_1).

No estudo de caso, o resultado da análise de desempenho das alternativas, fornecida pelos especialistas, foi empregada na aplicação do método *Fuzzy-VIKOR*. Em relação à estratégia de decisão, foram avaliados três cenários distintos: o de neutralidade quanto à preferência pelos benefícios associados à decisão ou minimização dos prejuízos associados à escolha ($v = 0,5$); o cenário de priorização dos benefícios associados à decisão ($v = 0,7$); e o cenário de minimização dos prejuízos associados à escolha ($v = 0,3$).

Para o cenário da neutralidade da preferência pelos benefícios associados à decisão ou minimização dos prejuízos associados à escolha ($v = 0,5$), a resposta fornecida pelo método *Fuzzy-VIKOR* apresentou a seguinte solução: $A1 > A2 > A3 > A4 > A5$. Com base na avaliação dos indicadores de vantagem aceitável e estabilidade aceitável do método *Fuzzy-VIKOR*, as alternativas A1 - Francis Horizontal Simples (FHS) e A2 - Francis Horizontal Dupla (FHD) são aceitas como solução de compromisso da pré-seleção.

No cenário de priorização dos benefícios associados à decisão ($v = 0,7$), o resultado provido pelo método *Fuzzy-VIKOR* mostrou como solução o seguinte ranking: $A1 > A2 > A3 > A4 > A5$. A verificação quanto ao atendimento aos indicadores de vantagem aceitável e estabilidade aceitável do método citado remete às alternativas A1 - Francis Horizontal Simples (FHS) e A2 - Francis Horizontal Dupla (FHD) como aprovadas para compor a solução de compromisso da pré-seleção.

Para o cenário de minimização dos prejuízos associados à escolha ($v = 0,3$), a aplicação do método *Fuzzy-VIKOR* trouxe como resultado a seguinte solução: $A1 > A2 > A3 > A4 > A5$. A avaliação dos indicadores do método *Fuzzy-VIKOR* (vantagem aceitável e estabilidade aceitável), considera as alternativas A1 - Francis Horizontal Simples (FHS) e A2 - Francis Horizontal Dupla (FHD) como solução de compromisso aceitável da pré-seleção.

A turbina Francis Horizontal Simples (FHS) se mostrou como alternativa válida tanto na opinião dos especialistas, quanto nas preferências do investidor, e pode ser considerada como solução global para os casos cujos dados técnicos do empreendimento convirjam para os valores de 20 m a 35 m, para alturas de queda, e 10 m³/s a 30 m³/s, para valores de vazão.

Assim, é caracterizado o pleno atendimento ao objetivo geral, cujo propósito era de desenvolver um modelo de pré-seleção de turbinas hidráulicas por meio de uma abordagem multicritério *Fuzzy*, para situações em que os dados técnicos de altura de queda e vazão, disponíveis para instalação do empreendimento, representem conflito na escolha das configurações existentes.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento desta dissertação, foram observadas algumas limitações do estudo, bem como oportunidades de complemento ao modelo desenvolvido, das quais se destacam: (i) adequar o modelo existente, possibilitando ampliar a faixa de dados técnicos e incluir opções de alternativas, como turbinas Pelton, nas configurações de montagem horizontal e vertical; e (ii) agregar considerações, como a curva de vazões históricas, permitindo definir o modelo de turbina ideal para instalação e a quantidade de máquinas a ser instalada no empreendimento, segundo característica de cada variante de turbina hidráulica.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, L. Fuzzy Multi Criteria Decision Making and its Applications: A Brief Review of Category. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 97, p. 131–136, 2013.

ABRAPCH, A. B. DE PCH. E CGH. **Cartilha de Benefícios Socioambientais das PCHs e CGHs**. Disponível em: <<http://www.abrapch.org.br/admin/arquivos/arquivos/5/cartilha-final-comprimido-77.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2018.

ADHIKARY, P.; KUNDU, S.; ROY, P. K.; MAZUMDAR, A. Optimum selection of hydraulic turbine manufacturer for SHP:MCDA or MCDM tools. **World Applied Sciences Journal**, v. 28, n. 7, p. 914–919, 2013.

AK, M.; KENTEL, E.; KUCUKALI, S. A fuzzy logic tool to evaluate low-head hydropower technologies at the outlet of wastewater treatment plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 727–737, 2017.

AKASH, B. A.; MAMLOOK, R.; MOHSEN, M. S. Multi-criteria selection of electric power plants using analytical hierarchy process. **Electric Power Systems Research**, v. 52, n. 1, p. 29–35, 1999.

ALEXANDER, K. V.; GIDDENS, E. P. Microhydro: Cost-effective, modular systems for low heads. **Renewable Energy**, v. 33, n. 6, p. 1379–1391, 2008.

ALSTOM BRASIL. **O Estado da Arte em PCHs na Alston**. (R. Miranda, Ed.) VI Simpósio de Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. **Anais...**Belo Horizonte: 2008 Disponível em: <<http://www.cbdb.org.br/simposio/Microsoft PowerPoint - Roberto Miranda - VI Simposio Peq e Med - 15-04-2008 Reconfig.pdf>>

ANDRITZ, G. **Seleção Turbina - Andritz**. Disponível em: <<https://www.andritz.com/products-en/group/markets/small-mini-hydropower-plants>>. Acesso em: 27 maio. 2018.

ANEEL - AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Capacidade de Geração do Brasil (2019a)**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 21 jul. 2019.

ANEEL, A. N. DE E. E. **Resolução Normativa nº 673, de 4 de agosto de 2015**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015673.pdf>>. Acesso em: 11 fev. 2019.

ANEEL, A. N. DE E. E. **Como nasce uma PCH (2017)**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/pequenas-centrais-hidreletricas-permitirao-acrescimo-de-7-000-mw-ao-sistema/656877>. Acesso em: 2 mar. 2019.

ANEEL, A. N. DE E. E. **Resumo Geral dos Novos Empreendimentos de Geração**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/publicacoes>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

ANEEL, A. N. DE E. E. **Fontes de Energia (2019b)**. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/Combustivel.cfm>>. Acesso em: 17 mar. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6445:2016 - Turbinas hidráulicas, turbinas-bombas e bombas de acumulação**, 2016.

BOCHI, C. **Bochi Hydroelectric Equipment**. Disponível em: <<http://www.bochihydro.com>>. Acesso em: 14 fev. 2019.

BORKOWSKI, D. **Small Hydropower Plant as a supplier for the primary energy consumer**. Proceedings of the 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2015. **Anais...2015**

BRASIL. **Lei Nº 13.360, de 17 de novembro de 2016**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/lei/L13360.htm>. Acesso em: 11 fev. 2019a.

BRASIL. **Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9074cons.htm>. Acesso em: 11 fev. 2019b.

BREKKE, H. **Hydraulic Turbines - Design, Erection and Operation**. [s.l: s.n.].

CAUCHICK MIGUEL, P. A. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier: ABEPRO, 2012.

CHATZIMOURATIDIS, A. I.; PILAVACHI, P. A. Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process. **Energy Policy**, v. 37, n. 3, p. 778–787, 2009.

DUCKSTEIN, L.; OPRICOVIC, S. Multiobjective optimization in river basin development. **Water Resources Research**, v. 16, n. 1, p. 14–20, 1980.

ELBATRAN, A. H.; ABDEL-HAMED, M. W.; YAAKOB, O. B.; AHMED, Y. M.; ISMAIL, M. Hydro power and turbine systems reviews. **Jurnal Teknologi**, v. 74, n. 5, p. 83–90, 2015.

ELBATRAN, A. H.; YAAKOB, O. B.; AHMED, Y. M.; SHABARA, H. M. Operation, performance and economic analysis of low head micro-hydropower turbines for rural and remote areas: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 40–50, 2015.

ELETROBRÁS. CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. **Diretrizes para Estudos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Brasília. Brazil: Ministério de Minas e Energia (MME), 2000.

ENSSLIN, L.; LACERDA, R. T. O.; TASCA, J. E. **ProKnow-C, Knowledge Development Process– Constructivist Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI**Brasil, 2010.

FICHTNER MANAGEMENT CONSULTING AG. **Hydroelectric Power - A Guide for Developers and Investors**. [s.l: s.n.].

FILHO, G. L. T.; SANTOS, I. F. S. DOS; BARROS, R. M. Cost estimate of small hydroelectric power plants based on the aspect factor. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, n. April, p. 229–238, 2017.

FOX, R. W. MCDONALD, A. T. PRITCHARD, P. J. **Introdução À Mecânica Dos Fluidos**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

GAGLIANO, A.; TINA, G. M.; NOCERA, F.; PATANIA, F. **Technical and Economic**

- Perspective for Repowering of Micro Hydro Power Plants: a Case Study of an Early XX Century Power Plant.** (R. Howlett, Ed.)Energy Procedia. **Anais...: Energy Procedia**.2014Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214034444>>
- GAREGNANI, G.; SACCHELLI, S.; BALEST, J.; ZAMBELLI, P. GIS-based approach for assessing the energy potential and the financial feasibility of run-off-river hydro-power in Alpine valleys. **Applied Energy**, v. 216, n. October 2017, p. 709–723, 2018.
- GAVADE, R. K. Multi-Criteria Decision Making : An overview of different selection problems and methods. **International Journal of Computer Science and Information Technologies**, v. 5, n. 4, p. 5643–5646, 2014.
- GIL, A. C. A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo, Brasil: [s.n.]. v. 5
- GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R.; TANSCHKEIT, R. Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações. **Proc. 6 th IFSA Congress-Tutorials**, n. July, p. 1–38, 2015.
- GONO, R. NOVAK, M. GONO, M. KYNCL, M. **Utilization of small hydropower**. 2013 13th International Conference on Environment and Electrical Engineering, IEEEIC 2013 - Conference Proceedings. **Anais...2013**
- GORDON, J. L. **Turbine selection for small low-head hydro developments**. Innovative Small Hydro Technologies. **Anais...New York,:** Natural Resources Canada, 2003
- HENN, É. A. L. **Máquinas de Fluxo**. 2. ed. Santa Maria, Brasil: Editora UFSM, 2006.
- IESA - INEPAR. **Como funciona uma Usina Hidrelétrica**. Disponível em: <<http://www.inepar.com.br>>. Acesso em: 27 maio. 2018.
- IGUAL, J. DE. **Salto de Agua - Motores e Instalaciones Hidraulicas**. Madrid, Spanish: Dossat, 1921.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61116:1992 - Electromechanical equipment guide for small hydroelectric installations**, 1992.
- ISHIZAKA, A.; LABIB, A. **Review of the main developments in the analytic hierarchy processExpert Systems with Applications**Elsevier Ltd, , 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.143>>
- J. GALE, E. HÖFLER, A. B. Compact Vertical Axial Turbine " Saxo ". **Seminar on Hydropower Plants**, n. November, 2010.
- JALIU, C. VISA, I. DIACONESCU, D. SAULESCU, R. NEAGOE, M. CLIMESCU, O. **Dynamic model of a small hydropower plant**. 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. **Anais...2010**
- KABAK, M.; DAĞDEVIREN, M. Prioritization of renewable energy sources for Turkey by using a hybrid MCDM methodology. **Energy Conversion and Management**, v. 79, p. 25–33, 2014.
- KARSAK, E. E.; DURSUN, M. An integrated fuzzy MCDM approach for supplier evaluation and selection. **Computers and Industrial Engineering**, v. 82, p. 82–93, 2015.

KATAL, F.; FAZELPOUR, F. Multi-criteria evaluation and priority analysis of different types of existing power plants in Iran: An optimized energy planning system. **Renewable Energy**, v. 120, p. 163–177, 2018.

KAUNDA, C. S.; KIMAMBO, C. Z.; NIELSEN, T. K. A technical discussion on microhydropower technology and its turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 35, p. 445–459, 2014.

KOVALEV, N. N. **Hydroturbine - Desing and Construction**. Jerusalem: National Science Foundation, 1965.

KUMAR, R.; SINGAL, S. K. Operation and Maintenance Problems in Hydro Turbine Material in Small Hydro Power Plant. **Materials Today: Proceedings**, v. 2, n. 4–5, p. 2323–2331, 2015a.

KUMAR, R.; SINGAL, S. K. Penstock material selection in small hydropower plants using MADM methods. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 240–255, 2015b.

KUMAR, R.; SINGAL, S. K. Selection of best Operating Site of SHP plant based on performance. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, Procedia Social and Behavioral Sciences. v. 189, p. 110–116, 2015c.

LI, R.; DONG, J.; WANG, D. Competition ability evaluation of power generation enterprises using a hybrid MCDM method under fuzzy and hesitant linguistic environment. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 10, n. 5, 2018.

LOOTS, I.; VAN DIJK, M.; BARTA, B.; VAN VUUREN, S. J.; BHAGWAN, J. N. A review of low head hydropower technologies and applications in a South African context. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 1254–1268, 2015.

MACINTYRE, A. J. **Máquinas Motrizes Hidráulicas**. Rio de Janeiro, Brasil: Guanabara Dois, 1983.

MAJUMDER, P.; MAJUMDER, M.; SAHA, A. K.; NATH, S. Selection of features for analysis of reliability of performance in hydropower plants: a multi-criteria decision making approach. **Environment, Development and Sustainability**, n. 0123456789, 2019.

MAKARON, P. **Análise de Viabilidade de Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas: Pontos Críticos de Sucesso a Partir de Estudos de Caso no Estado de Santa Catarina**São PauloUSP – Programa de Pós-graduação em Energia – EP/FEA/IEE/IF, , 2012.

MARDANI, A.; JUSOH, A.; NOR, K. MD.; KHALIFAH, Z.; ZAKWAN, N.; VALIPOUR, A. Multiple criteria decision-making techniques and their applications - A review of the literature from 2000 to 2014. **Economic Research-Ekonomika Istrazivanja**, v. 28, n. 1, p. 516–571, 2015.

MARDANI, A.; JUSOH, A.; ZAVADSKAS, E. K. Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications - Two decades review from 1994 to 2014. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 8, p. 4126–4148, 2015.

MARDANI, A.; ZAVADSKAS, E. K.; KHALIFAH, Z.; ZAKUAN, N.; JUSOH, A.; NOR, K. MD.; KHOSHNOUDI, M. A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 216–256, 2017.

MIRA, B. **Turbina Francis - Fenômenos de Transporte de Massa, Energia e Momentum**. Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/3625139/>>. Acesso em: 12 fev. 2019.

MISHRA, S.; SINGAL, S. K.; KHATOD, D. K. **Optimal installation of small hydropower plant - A review** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Elsevier Ltd, , 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.008>>

MISHRA, S.; SINGAL, S. K.; KHATOD, D. K. A review on electromechanical equipment applicable to small hydropower plants. **International Journal of Energy Research**, v. 4, p. 553–571, 2012.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Manual de Inventário Hidroelétrico de Bacias Hidrográficas**. Brasília, Brazil: Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, 2007.

MONDAL, S. P.; MANDAL, M. Pentagonal fuzzy number, its properties and application in fuzzy equation. **Future Computing and Informatics Journal**, v. 2, n. 2, p. 110–117, 2017.

NADABAN, S.; DZITAC, S.; DZITAC, I. **Fuzzy TOPSIS: A General View**. (J. Lee, H and Shi, Y and Lee, J and Cordova, F and Dzitac, I and Kou, G and Li, Ed.) *Promoting Business Analytics and Quantitative Management of Technology: 4th International Conference on Information Technology and Quantitative Management (ITQM 2016)*. **Anais...**: Procedia Computer Science.2016

OGAYAR, B.; VIDAL, P. G. Cost determination of the electro-mechanical equipment of a small hydro-power plant. **Renewable Energy**, v. 34, n. 1, p. 6–13, 2009.

OKOT, D. K. Review of small hydropower technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, p. 515–520, 2013.

OPRICOVIC, S. A fuzzy compromise solution for multicriteria problems. **International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems**, v. 15, n. 03, p. 363–380, 2007.

OPRICOVIC, S. Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 10, p. 12983–12990, 2011.

ÖZCAN, E. C.; ÜNLÜSOY, S.; EREN, T. A combined goal programming – AHP approach supported with TOPSIS for maintenance strategy selection in hydroelectric power plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, n. February, p. 1410–1423, 2017.

PRADO, F, A.; ATHAYDE, S.; MOSSA, J.; BOHLMAN, S.; LEITE, F.; OLIVER-SMITH, A. How much is enough? An integrated examination of energy security, economic growth and climate change related to hydropower expansion in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1132–1136, 2016.

RAABE, J. **Hydro Power Design, Use, and Function of Hydromechanical Hydraulic and Electrical Equipment**. Würzburg: VDI-Verlag GmbH, 1985.

RAGIN, C. **Fuzzy-Set Social Science**. Chicago: University of Chicago Press, 2000.

RENTERÍA, A. R. **Estimación de Probabilidade Fuzzy a Patir de Dados Impecisos**. [s.l.] PUC - Rio, 2006.

RHEINGANTZ, P. Lógica fuzzy e variáveis lingüísticas aplicadas na avaliação de

desempenho de edifícios de escritório. **Ambiente Construído**, p. 41–55, 2002.

ROMANELLI, J. P.; SILVA, L. G. M.; HORTA, A.; PICOLI, R. A. Site Selection for Hydropower Development: A GIS-Based Framework to Improve Planning in Brazil. **JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING**, v. 144, n. 7, jul. 2018.

ROSSO, M.; BOTTERO, M.; POMARICO, S.; FERLITA, S. LA.; COMINO, E. Integrating multicriteria evaluation and stakeholders analysis for assessing hydropower projects. **Energy Policy**, v. 67, p. 870–881, 2014.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, n. 3, p. 234–281, 1977.

SAMORA, I.; MANSO, P.; FRANCA, M. J.; SCHLEISS, A. J.; RAMOS, H. M. Opportunity and economic feasibility of inline microhydropower units in water supply networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 11, 2016.

SANGAL, S.; GARG, A.; KUMAR, D. Review of Optimal Selection of Turbines for Hydroelectric Projects. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 3, n. 3, p. 424–430, 2013.

SANTOLIN, A. CAVAZZINI, G. PAVESI, G. ARDIZZON, G. ROSSETTI, A. Techno-economical method for the capacity sizing of a small hydropower plant. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 7, p. 2533–2541, 2011.

SEMI, I. L. **Soluções Integradas para PCHs**, 2016. Disponível em: <[http://www.evecon.com.br/projecta/cbdb2016/palestras/Robert Fink - Semi Industrial - 27 abril.pdf](http://www.evecon.com.br/projecta/cbdb2016/palestras/Robert_Fink_-_Semi_Industrial_-_27_abril.pdf)>

SHIMRAY, B. A.; SINGH, K. M.; MEHTA, R. K. A survey of Multi-Criteria Decision Making Technique used in Renewable Energy Planning. **International Journal of Computer ...**, v. 4523, n. Mcdm, p. 124–140, 2017.

SIKSNELYTE, I.; ZAVADSKAS, E. K.; STREIMIKIENE, D.; SHARMA, D. An overview of multi-criteria decision-making methods in dealing with sustainable energy development issues. **Energies**, v. 11, n. 10, 2018.

SIMONE, G. A. **Centrais e Aproveitamentos Hidrelétricos - Uma introdução ao Estudo**. São Paulo: Érica, 2000.

SINGAL, S. Planning and Implementation of Small Hydropower (SHP) Projects. **Hydro Nepal: Journal of Water, Energy and**, n. 5, p. 21–25, 2009.

SINGAL, S. K.; SAINI, R. P. Cost analysis of low-head dam-toe small hydropower plants based on number of generating units. **Energy for Sustainable Development**, v. 12, n. 3, p. 55–60, 2008.

SINGAL, S. K.; SAINI, R. P.; RAGHUVANSHI, C. S. Analysis for cost estimation of low head run-of-river small hydropower schemes. **Energy for Sustainable Development**, v. 14, n. 2, p. 117–126, jun. 2010.

SINGH, V. K.; SINGAL, S. K. Operation of hydro power plants-a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, n. November 2015, p. 610–619, 2017.

SOLANGI, Y. A.; TAN, Q.; MIRJAT, N. H.; ALI, S. Evaluating the strategies for sustainable energy planning in Pakistan: An integrated SWOT-AHP and Fuzzy-TOPSIS approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 236, p. 117655, nov. 2019.

- SRDJEVIC, B. Combining different prioritization methods in the analytic hierarchy process synthesis. **Computers and Operations Research**, v. 32, n. 7, p. 1897–1919, 2005.
- STEIN, W. E.; MIZZI, P. J. The harmonic consistency index for the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 177, n. 1, p. 488–497, 2007.
- SUGANTHI, L.; INIYAN, S.; SAMUEL, A. A. Applications of fuzzy logic in renewable energy systems - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 585–607, 2015.
- SUPRIYASILP, T.; PONGPUT, K.; BOONYASIRIKUL, T. Hydropower development priority using MCDM method. **Energy Policy**, v. 37, n. 5, p. 1866–1875, 2009.
- TASRI, A.; SUSILAWATI, A. Selection among renewable energy alternatives based on a fuzzy analytic hierarchy process in Indonesia. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 7, p. 34–44, 2014.
- TRAILLI, F. C. **Modelagem Dinâmica de Rotores de Unidades Hidrogeradoras**. [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2018.
- TUNA, M. C. Feasibility Assessment of Hydroelectric Power Plant in Ungauged River Basin: A Case Study. **ARABIAN JOURNAL FOR SCIENCE AND ENGINEERING**, v. 38, n. 6, p. 1359–1367, jun. 2013.
- VANIČEK, J.; VRANA, I.; ALY, S. Fuzzy aggregation and averaging for group decision making: A generalization and survey. **Knowledge-Based Systems**, v. 22, n. 1, p. 79–84, 2009.
- VOITH, H. **Petites centrales hydroélectriques**. Disponível em: <<http://www.voith.com/br/produtos-e-servicos/energia-hidreletrica/pequenas-centrais-hidreletricas-552.html>>.
- WANG, Y.; XU, L.; SOLANGI, Y. A. Strategic renewable energy resources selection for Pakistan: Based on SWOT-Fuzzy AHP approach. **Sustainable Cities and Society**, v. 52, 1 jan. 2019.
- WEG, S. **Aplicação de Turbinas Hidráulicas - Documento Interno**. [s.l.: s.n.].
- WILLIAMSON, S. J.; STARK, B. H.; BOOKER, J. D. Low head pico hydro turbine selection using a multi-criteria analysis. **Renewable Energy**, v. 61, p. 43–50, 2014.
- WU, Z.; AHMAD, J.; XU, J. A group decision making framework based on fuzzy VIKOR approach for machine tool selection with linguistic information. **Applied Soft Computing Journal**, v. 42, p. 314–324, 2016.
- ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. **Information and control**, v. 8, p. 338–353, 1965.
- ZADEH, L. A.; JOSE, S. The Concept of a Linguistic Variable II. **Electrical Engineering**, v. 357, p. 301–357, 1975.
- ZHOU, J. X.; HU, M.; CAI, F. L.; HUANG, X. T. **Effects of turbine's selection on hydraulic transients in the long pressurized water conveyance system**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **Anais...2014**
- ZIMMERMANN, H. J. **Fuzzy set theory and its applications - Fourth Edition**. [s.l.] Springer Science+Business Media, LLC, 2001.

APÉNDICE A

Figura 25 - Comparação entre grupos de critérios.

Aluno: Rudimar Caricimi

PESQUISA DE PREFERÊNCIA PARA CRITÉRIOS DE APLICAÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS

O objetivo desta pesquisa é verificar a preferência de especialistas quanto aos critérios: Desempenho, Custo Turbina-Gerador, Custo de Equipamentos Periféricos e Custo de Construção Civil.

Como Desempenho se entende a maior produção de energia elétrica durante o ciclo de vida do empreendimento. Este critério tem ligação direta com o tipo de turbina a ser empregado na PCH/CGH. Para o critério Custo Turbina-Gerador, entende-se como: os custos iniciais de aquisição desses equipamentos, o custo de operação, o custo de manutenção e custo de indisponibilidade, sendo este último explicado pela perda de geração em decorrência de paradas não programadas para manutenção e/ou condições de vazão abaixo no mínimo operacional admitido pela turbina instalada.

Estão associados ao Custo de Equipamentos Periféricos, os custos de Equipamento de Levantamento, Custo de Equipamentos Hidromecânicos, Custo do Conduto Forçado e Custo de Sistemas Auxiliares. No critério Custo de Construção Civil estão compreendidos os Custos de Escavação, Concreto Armado, Custo da Superestrutura da Casa de Força e Custos da Barragem e Tomada d'Água.

Sabe-se que a definição da melhor opção turbina-gerador leva em consideração os critério (e subcritérios) informados acima, durante a fase de análise de viabilidade técnica-econômica. Nisso, pede-se avaliar a relação entre critérios a seguir:

Ao comparar dois critérios informe, na sua opinião, qual o critério mais relevante:

Desempenho < > Custo Turbina-Gerador

Defina a intensidade da importância: ▼

Desempenho < > Custo Equipamentos Periféricos

Defina a intensidade da importância: ▼

Desempenho < > Custo Construção Civil

Defina a intensidade da importância: ▼

Custo Turbina-Gerador < > Custo Equipamentos Periféricos

Defina a intensidade da importância: ▼

Custo Turbina-Gerador < > Custo Construção Civil

Defina a intensidade da importância: ▼

Custo Equipamentos Periféricos < > Custo Construção Civil

Defina a intensidade da importância: ▼

Figura 26 - Comparação entre critérios do grupo Eficiência Energética.

Aluno: Rudimar Caricimi

PESQUISA DE PREFERÊNCIA PARA CRITÉRIOS DE APLICAÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS

O objetivo desta pesquisa é verificar a preferência de especialistas quanto aos critérios: Desempenho, Custo Turbina-Gerador, Custo de Equipamentos Periféricos e Custo de Construção Civil.

Como Desempenho se entende a maior produção de energia elétrica durante o ciclo de vida do empreendimento. Este critério tem ligação direta com o tipo de turbina a ser empregado na PCH/CGH.

Para o critério Custo Turbina-Gerador, entende-se como: os custos iniciais de aquisição desses equipamentos, o custo de operação, o custo de manutenção e custo de indisponibilidade, sendo este último explicado pela perda de geração em decorrência de paradas não programadas para manutenção e/ou condições de vazão abaixo no mínimo operacional admitido pela turbina instalada.

Estão associados ao Custo de Equipamentos Periféricos, os custos de Equipamento de Levantamento, Custo de Equipamentos Hidromecânicos, Custo do Conduto Forçado e Custo de Sistemas Auxiliares.

No critério Custo de Construção Civil estão compreendidos os Custos de Escavação, Concreto Armado, Custo da Superestrutura da Casa de Força e Custos da Barragem e Tomada d'Água.

Sabe-se que a definição da melhor opção turbina-gerador leva em consideração os critério (e subcritérios) informados acima, durante a fase de análise de viabilidade técnica-econômica. Nisso, pede-se avaliar a relação entre critérios a seguir:

Nesta etapa de comparação dos subcritérios de Desempenho, informe, na sua opinião, qual o subcritério mais relevante:

Suportar maior variação de queda < > Suportar maior variação de vazão

Defina a intensidade da importância:

Suportar maior variação de queda < > Melhor eficiência hidráulica

Defina a intensidade da importância:

Suportar maior variação de queda < > Ter maior disponibilidade para geração

Defina a intensidade da importância:

Suportar maior variação de vazão < > Melhor eficiência hidráulica

Defina a intensidade da importância:

Suportar maior variação de vazão < > Ter maior disponibilidade para geração

Defina a intensidade da importância:

Melhor eficiência hidráulica < > Ter maior disponibilidade para geração

Defina a intensidade da importância:

Figura 27 - Comparação entre critérios do grupo Custo Turbina-Gerador.

Aluno: Rudimar Caricimi

PESQUISA DE PREFERÊNCIA PARA CRITÉRIOS DE APLICAÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS

O objetivo desta pesquisa é verificar a preferência de especialistas quanto aos critérios: Desempenho, Custo Turbina-Gerador, Custo de Equipamentos Periféricos e Custo de Construção Civil.

Como Desempenho se entende a maior produção de energia elétrica durante o ciclo de vida do empreendimento. Este critério tem ligação direta com o tipo de turbina a ser empregado na PCH/CGH.

Para o critério Custo Turbina-Gerador, entende-se como: os custos iniciais de aquisição desses equipamentos, o custo de operação, o custo de manutenção e custo de indisponibilidade, sendo este último explicado pela perda de geração em decorrência de paradas não programadas para manutenção e/ou condições de vazão abaixo no mínimo operacional admitido pela turbina instalada.

Estão associados ao Custo de Equipamentos Periféricos, os custos de Equipamento de Levantamento, Custo de Equipamentos Hidromecânicos, Custo do Conduto Forçado e Custo de Sistemas Auxiliares.

No critério Custo de Construção Civil estão compreendidos os Custos de Escavação, Concreto Armado, Custo da Superestrutura da Casa de Força e Custos da Barragem e Tomada d'Água.

Sabe-se que a definição da melhor opção turbina-gerador leva em consideração os critério (e subcritérios) informados acima, durante a fase de análise de viabilidade técnica-econômica.

Nisso, pede-se avaliar a relação entre critérios a seguir:

Nesta etapa de comparação dos subcritérios de Custo Turbina-Gerador, informe, na sua opinião, qual o subcritério mais relevante:

Custo Aquisição Turbina-Gerador < > Custo de Operação Turbina-Gerador

Defina a intensidade da importância:

Custo Aquisição Turbina-Gerador < > Custo de manutenção Turbina-Gerador

Defina a intensidade da importância:

Custo Aquisição Turbina-Gerador < > Custo da Indisponibilidade Turbina-Gerador

Defina a intensidade da importância:

Custo de Operação Turbina-Gerador < > Custo de manutenção Turbina-Gerador

Defina a intensidade da importância:

Custo de Operação Turbina-Gerador < > Custo da Indisponibilidade Turbina-Gerador

Defina a intensidade da importância:

Custo de manutenção Turbina-Gerador < > Custo da Indisponibilidade Turbina-Gerador

Defina a intensidade da importância:

Figura 28 - Comparação entre critérios do grupo Custo Equipamento Periféricos.

Aluno: Rudimar Caricimi

PESQUISA DE PREFERÊNCIA PARA CRITÉRIOS DE APLICAÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS

O objetivo desta pesquisa é verificar a preferência de especialistas quanto aos critérios: Desempenho, Custo Turbina-Gerador, Custo de Equipamentos Periféricos e Custo de Construção Civil.

Como Desempenho se entende a maior produção de energia elétrica durante o ciclo de vida do empreendimento. Este critério tem ligação direta com o tipo de turbina a ser empregado na PCH/CGH. Para o critério Custo Turbina-Gerador, entende-se como: os custos iniciais de aquisição desses equipamentos, o custo de operação, o custo de manutenção e custo de indisponibilidade, sendo este último explicado pela perda de geração em decorrência de paradas não programadas para manutenção e/ou condições de vazão abaixo no mínimo operacional admitido pela turbina instalada.

Estão associados ao Custo de Equipamentos Periféricos, os custos de Equipamento de Levantamento, Custo de Equipamentos Hidromecânicos, Custo do Conduto Forçado e Custo de Sistemas Auxiliares.

No critério Custo de Construção Civil estão compreendidos os Custos de Escavação, Concreto Armado, Custo da Superestrutura da Casa de Força e Custos da Barragem e Tomada d'Água.

Sabe-se que a definição da melhor opção turbina-gerador leva em consideração os critério (e subcritérios) informados acima, durante a fase de análise de viabilidade técnica-econômica.

Nisso, pede-se avaliar a relação entre critérios a seguir:

Nesta etapa de comparação dos subcritérios de Custo dos Equipamentos Periféricos, informe, na sua opinião, qual o subcritério mais relevante:

Custo Equipamento Levantamento < > Custo Equipamentos Hidromecânicos

Defina a intensidade da importância: ▼

Custo Equipamento Levantamento < > Custo Conduto Forçado

Defina a intensidade da importância: ▼

Custo Equipamento Levantamento < > Custo Sistemas Auxiliares

Defina a intensidade da importância: ▼

Custo Equipamentos Hidromecânicos < > Custo Conduto Forçado

Defina a intensidade da importância: ▼

Custo Equipamentos Hidromecânicos < > Custo Sistemas Auxiliares

Defina a intensidade da importância: ▼

Custo Conduto Forçado < > Custo Sistemas Auxiliares

Defina a intensidade da importância: ▼

Figura 29 - Comparação entre critérios do grupo Custo de Construção Civil.

Aluno: Rudimar Caricimi

PESQUISA DE PREFERÊNCIA PARA CRITÉRIOS DE APLICAÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS

O objetivo desta pesquisa é verificar a preferência de especialistas quanto aos critérios: Desempenho, Custo Turbina-Gerador, Custo de Equipamentos Periféricos e Custo de Construção Civil.

Como Desempenho se entende a maior produção de energia elétrica durante o ciclo de vida do empreendimento. Este critério tem ligação direta com o tipo de turbina a ser empregado na PCH/CGH.

Para o critério Custo Turbina-Gerador, entende-se como: os custos iniciais de aquisição desses equipamentos, o custo de operação, o custo de manutenção e custo de indisponibilidade, sendo este último explicado pela perda de geração em decorrência de paradas não programadas para manutenção e/ou condições de vazão abaixo no mínimo operacional admitido pela turbina instalada.

Estão associados ao Custo de Equipamentos Periféricos, os custos de Equipamento de Levantamento, Custo de Equipamentos Hidromecânicos, Custo do Conduto Forçado e Custo de Sistemas Auxiliares.

No critério Custo de Construção Civil estão compreendidos os Custos de Escavação, Concreto Armado, Custo da Superestrutura da Casa de Força e Custos da Barragem e Tomada d'Água.

Sabe-se que a definição da melhor opção turbina-gerador leva em consideração os critério (e subcritérios) informados acima, durante a fase de análise de viabilidade técnica-econômica.

Nisso, pede-se avaliar a relação entre critérios a seguir:

Nesta etapa de comparação dos subcritérios de Custo Turbina-Gerador, informe, na sua opinião, qual o subcritério mais relevante:

Custo Aquisição Turbina-Gerador < > Custo de Operação Turbina-Gerador

Defina a intensidade da importância:

Custo Aquisição Turbina-Gerador < > Custo de manutenção Turbina-Gerador

Defina a intensidade da importância:

Custo Aquisição Turbina-Gerador < > Custo da Indisponibilidade Turbina-Gerador

Defina a intensidade da importância:

Custo de Operação Turbina-Gerador < > Custo de manutenção Turbina-Gerador

Defina a intensidade da importância:

Custo de Operação Turbina-Gerador < > Custo da Indisponibilidade Turbina-Gerador

Defina a intensidade da importância:

Custo de manutenção Turbina-Gerador < > Custo da Indisponibilidade Turbina-Gerador

Defina a intensidade da importância: