

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**Otimização multiobjetivo usando Algoritmo Genético
de Classificação Não Dominada para a operação ótima
de Pequenas Centrais Hidrelétricas em cascata**

FRANCISCO WELLINGTON MARTINS DA SILVA

FRANCISCO WELLINGTON MARTINS DA SILVA

**Otimização multiobjetivo usando Algoritmo Genético
de Classificação Não Dominada para a operação ótima
de Pequenas Centrais Hidrelétricas em cascata**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: José Roberto Camacho, Ph.D. (UFU)

Coorientador: Jacson Hudson Inácio Ferreira, Dr. (IFTM)

Uberlândia-MG

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S586
2025 Silva, Francisco Wellington Martins da, 1992-
Otimização Multiobjetivo usando Algoritmo Genético de
Classificação Não Dominada para a operação ótima de
Pequenas Centrais Hidrelétricas em Cascata [recurso
eletrônico] / Francisco Wellington Martins da Silva. -
2025.

Orientador: José Roberto Camacho.

Coorientador: Jacson Hudson Inácio Ferreira.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2025.212>

Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica. I. Camacho, José Roberto ,
1954-, (Orient.). II. Ferreira, Jacson Hudson Inácio,
1988-, (Coorient.). III. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. IV.
Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

| | | | | | |
|------------------------------------|--|-----------------|-------|-----------------------|-------|
| Programa de Pós-Graduação em: | Engenharia Elétrica | | | | |
| Defesa de: | Tese de Doutorado, 345 , PPGEELT | | | | |
| Data: | Vinte e um de Março de Dois mil e vinte e cinco | Hora de início: | 14:00 | Hora de encerramento: | 17:00 |
| Matrícula do Discente: | 12023EEL008 | | | | |
| Nome do Discente: | Francisco Wellington Martins da Silva | | | | |
| Título do Trabalho: | Otimização Multiobjetivo usando Algoritmo Genético de Classificação Não Dominada para a operação ótima de Pequenas Centrais Hidrelétricas em Cascata. | | | | |
| Área de concentração: | Sistemas de Energia Elétrica | | | | |
| Linha de pesquisa: | Sistemas Elétricos de Potência | | | | |
| Projeto de Pesquisa de vinculação: | Coordenador do projeto: José Roberto Camacho. Título do projeto: Estudo de Fontes Renováveis em Sistemas Elétricos. Agência financiadora: Não se aplica. Número do processo na agência financiadora: Não se aplica. Vigência do projeto: 2020 - atual. | | | | |

Reuniu-se no formato híbrido, na Sala Vermelha do Bloco 7A da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta:

Doutores: Sebastião Camargo Guimarães Júnior (UFU), Keiji Yamanaka (UFU), Fabiana Aparecida de Toledo Silva (UFABC), Breno Brito Miranda (UFTM) e José Roberto Camacho, orientador do discente. O discente Francisco Wellington Martins da Silva e os professores Sebastião Camargo Guimarães Júnior, Keiji Yamanaka, Breno Brito Miranda e José Roberto Camacho participaram presencialmente. A professora Fabiana Aparecida de Toledo Silva participou remotamente (online).

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. José Roberto Camacho, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

APROVADO.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **José Roberto Camacho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/03/2025, às 18:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Breno Brito Miranda, Usuário Externo**, em 21/03/2025, às 18:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **FABIANA APARECIDA DE TOLEDO SILVA, Usuário Externo**, em 21/03/2025, às 20:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Keiji Yamanaka, Professor(a) do Magistério Superior**, em 22/03/2025, às 19:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sebastião Camargo Guimarães Júnior, Usuário Externo**, em 24/03/2025, às 09:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6092834** e o código CRC **C6CB1E76**.

*Dedico esse trabalho à minha família,
em especial ao meu Tio Zeca (In Memoriam).*

Agradecimentos

A Deus, dono de toda ciência, sabedoria e poder, criador do céu, da Terra e da vida, obrigado pela abundância de coisas boas que tem feito em minha vida.

À minha esposa, a qual chamo carinhosamente de Ivynha, expresso minha profunda gratidão por seu amor, pelas inúmeras ligações e mensagens durante os momentos em que estive sozinho na cidade de Uberlândia/MG. Agradeço por sempre me motivar quando me encontrava triste e desanimado. Obrigado pelo carinho, pela compreensão, pelo afeto e por ser essa pessoa excepcional na minha vida. Te amo!

Aos meus pais, dois cearenses que, enfrentaram inúmeras dificuldades para criar seus nove filhos, por meio da agricultura familiar, muitas vezes castigada pela estiagem, falta de recursos e incentivos. Mesmo assim superaram todas as dificuldades, criaram, com o suor de seus rostos, homens e mulheres íntegros. Muito Obrigado pelas valiosas lições de vida, que não se aprende em nenhuma Instituição de Ensino Superior. Muito obrigado por forjar meus princípios. Tenho muito orgulho de vocês. Quando eu “crescer” quero ser igual vocês!

Aos meus irmãos, agradeço por compartilharem comigo a trajetória da vida. E aos meus sobrinhos, que representam grandes presentes em nossa vida.

Ao meu orientador, Prof. José Roberto Camacho, PhD, expresso minha profunda gratidão pela orientação neste trabalho, pelos ensinamentos e pelo apoio ao longo desta jornada. Sou imensamente grato pelos valiosos conselhos, pelas conversas enriquecedoras e, sobretudo, pela sua amizade. Tenho um enorme carinho pelo Senhor e fiquei muito feliz em conhecer um “paulista-mineiro” tão gente boa. Levarei comigo muitas histórias da Nova Zelândia, de Uberlândia e de São Paulo para compartilhar com meus futuros alunos. O Senhor é uma verdadeira inspiração no exercício da docência. Meu sincero muito obrigado.

Ao meu coorientador, Prof. Jacson Hudson Inácio Ferreira, Dr. agradeço por compartilhar todas as referências do seu trabalho e pelas valiosas contribuições.

Ao prof. Igor Santos Peretta, PhD. pelas valiosas contribuições na elaboração do *script* do modelo Multiobjetivo. Muito obrigado pelas inúmeras reuniões e por sua dis-

ponibilidade.

Ao Professor Dr. Wellington Maycon Santos Bernardes, coordenador do Laboratório de Energias Alternativas e Proteção de Sistemas Elétricos (LEAPSE), e a todos os seus membros, expresso minha sincera gratidão pelo apoio e colaboração ao longo desta jornada.

Aos meus grandes amigos José Leonardo, Júnior Duarte e Jeylto Cruvinel, minha profunda gratidão pelas conversas, pelo apoio e pelas contribuições para este trabalho. Obrigado por compartilharem comigo esta jornada, que tantas vezes foi árdua, repleta de desafios, tristezas e incertezas. Vocês têm um lugar especial no meu coração.

À cidade de Uberlândia, Minas Gerais, que foi minha morada durante o doutorado, guardo profundas lembranças. Em minha mente, ficaram registrados o encanto de uma cidade linda, o exuberante pôr do sol e a acolhida calorosa do povo mineiro. Um lugar onde a natureza se entrelaça com a vida urbana, criando uma harmonia única. O Parque do Sabiá, verdadeiro patrimônio da cidade, foi meu refúgio em muitos momentos de meditação e renovação de energias.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU) por ser uma grande instituição que promove um ensino gratuito e de qualidade. E por ser um bem público a serviço do Brasil.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) por custear meus estudos, através de bolsa - Código de Financiamento 001.

À Companhia Paulista de Força de Luz (CPFL) e a China Three Gorges Brasil Energia S.A. (CTG Brasil) por permitir as visitas técnicas nas PCHs de estudo. Um agradecimento especial ao Paulo Perez operador de O&M das PCHs Dourados e São Joaquim e ao Ricardo, operador de O&M das PCHs Palmeiras e Retiro.

À toda coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGE-ELT) pelo apoio, em especial a Andressa Periollo pelo suporte nos trâmites administrativos.

À Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) por fornecer dados para minha pesquisa.

E por fim, a todos àqueles que me ajudaram de maneira direta e indireta. Meu muito obrigado!

*“Só eu sei cada passo por mim dado
nessa estrada esburacada que é a vida,
passei coisas que até mesmo Deus duvida,
fiquei triste, capiongo, aperreado,
porém nunca me senti desmotivado,
me agarrava sempre numa mão amiga,
e de forças minha alma era munida
pois do céu a voz de Deus dizia assim:
- Suba o queixo, meta os pés, confie em mim,
vá pra luta que eu cuido das feridas.”*
(Bráulio Bessa - Poeta cearense)

Resumo

O Brasil possui uma das matrizes energéticas mais diversificadas do mundo, com considerável participação das fontes renováveis, em especial as fontes hídricas. Considerando a crescente demanda por energia elétrica, a construção de grandes Usinas Hidrelétricas (UHEs) é um desafio da atualidade, tendo em vista, as questões ambientais, sociais, culturais e de outorga. Assim, faz-se necessário um olhar diferenciado aos empreendimentos de pequeno porte, como as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), bem como, a otimização na geração de energia elétrica. O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo multiobjetivo para operação ótima para as PCHs em cascata do Rio Sapucaí Paulista, sendo elas Dourados, São Joaquim, Palmeiras e Retiro. A metodologia abordada consiste em aplicar o Algoritmo Genético de Ordenação Não Dominada II (*Non-Dominated Sort Genetic Algorithms – NSGA - II*) no modelo multiobjetivo composto pelas funções de potência gerada no empreendimento, custo de Operação e Manutenção (O&M) e de perdas de carga para as PCHs em cascata. As curvas de eficiência da turbina e do gerador mostraram que o operador pode identificar uma faixa de operação eficiente do sistema, permitindo a geração de potência com menor consumo de recursos hídricos. Essa metodologia demonstra-se inovadora no contexto de PCHs, reforçando essa tese com a aplicação de testes estatísticos para a validação dessas funções. Os resultados do NSGA II demonstraram um ganho significativo na potência gerada na maioria dos meses do ano, principalmente no segundo semestre, quando os recursos energéticos estão críticos. Comparando com a potência real gerada no empreendimento, observou-se um ganho de 6% no mês de maio e de 10% em junho. Nos meses de julho, agosto, setembro e outubro, os ganhos superaram 100%, enquanto os meses de novembro e dezembro apresentaram ganhos de 88% e 64%, respectivamente. O uso do NSGA II pode ser uma excelente técnica para auxiliar no gerenciamento e tomada de decisão para a geração de energia elétrica em PCHs, de maneira mais eficiente.

Palavras-chave: Eficiência. Geração de Energia Elétrica. NSGA II. Otimização. Pe-

quenas Centrais Hidrelétricas.

Abstract

Brazil has one of the most diversified energy matrices in the world, with a significant share of renewable sources, particularly hydropower. Given the increasing demand for electricity, the construction of large Hydroelectric Power Plants (HPPs) presents contemporary challenges, especially considering environmental, social, cultural, and regulatory issues. Therefore, there is a growing need to focus on small-scale projects, such as Small Hydroelectric Power Plants (SHPPs), as well as on optimizing electricity generation. This study aims to develop a multi-objective model for the optimal operation of a cascade of SHPPs along the Sapucaí Paulista River, namely Dourados, São Joaquim, Palmeiras, and Retiro. The methodology consists of applying the Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) to a multi-objective model based on the functions of generated power, Operation and Maintenance (O&M) cost, and head losses across the cascade of SHPPs. The turbine and generator efficiency curves revealed that operators can identify an efficient operating range for the system, enabling power generation with reduced water resource consumption. This methodology proves to be innovative in the context of SHPPs, supported by statistical tests applied to validate the model's objective functions. The NSGA-II results showed a significant increase in power generation in most months of the year, particularly in the second semester when energy resources are more constrained. Compared to the actual power generated by the facilities, the gains in May and June were 6% and 10%, respectively. In July, August, September, and October, gains exceeded 100%, while November and December saw gains of 88% and 64%, respectively. The application of NSGA-II proves to be an excellent technique to support decision-making and enhance the efficiency of electricity generation in SHPPs.

Keywords: Efficiency. Electric Power Generation. NSGA-II. Optimization. Small Hydroelectric Power Plants.

Lista de ilustrações

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Participação das fontes na capacidade instalada | 41 |
| Figura 2 – Reduções das Emissões de carbono sob Cenário 1,5 °C (%). | 42 |
| Figura 3 – Localização das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) inventariadas e situação dos estudos conforme Resolução 875/2020 | 43 |
| Figura 4 – Números de PCHs em construção não iniciada, em construção e operação | 44 |
| Figura 5 – Prazos de implantação de PCHs | 45 |
| Figura 6 – Ações para a transição energética | 46 |
| Figura 7 – Conjunto de 5 soluções | 50 |
| Figura 8 – Frente de Pareto-Ótimo | 51 |
| Figura 9 – Solução de Pareto ótima marcada com curvas contínuas para quatro combinações de dois tipos de objetivos f_1 e f_2 | 52 |
| Figura 10 – Descrição do operador de cruzamento de um ponto de mutação | 54 |
| Figura 11 – Fluxograma do NSGA-II | 55 |
| Figura 12 – Esquemático ilustrativo do NSGA-II | 56 |
| Figura 13 – Fluxograma do NSGA-II | 57 |
| Figura 14 – Cálculo da distância de aglomeração. Os pontos marcados em círculos preenchidos são soluções da mesma frente não dominada | 60 |
| Figura 15 – Esquema simplificado de uma PCH de eixo horizontal | 69 |
| Figura 16 – Gráfico de faixa de aplicação para diferentes tipos de turbinas | 71 |
| Figura 17 – Turbina Bulbo | 72 |
| Figura 18 – Evolução dos valores de Operação & Manutenção (O&M) fixo, em R\$/kW.ano de projetos de PCH e CGH | 77 |
| Figura 19 – Evolução dos valores de O&M variável, em R\$/MWh.ano de projetos de PCH e CGH | 77 |
| Figura 20 – Fluxograma da Metodologia - obtenção da constante de perda de carga | 88 |
| Figura 21 – Fluxograma da Metodologia - obtenção dos coeficientes da função mul- tivariada de eficiência de cada turbina | 89 |

| | |
|---|-----|
| Figura 22 – Fluxograma da Metodologia - obtenção dos coeficientes da função de eficiência de cada gerador | 89 |
| Figura 23 – Fluxograma da Metodologia - dados de vazão | 90 |
| Figura 24 – Fluxograma da Metodologia - obtenção das séries de altura líquida de queda d'água de cada PCH | 91 |
| Figura 25 – PCH Dourados | 92 |
| Figura 26 – PCH São Joaquim | 93 |
| Figura 27 – PCH Palmeiras. | 94 |
| Figura 28 – PCH Retiro. | 96 |
| Figura 29 – Região de estudo - Bacia Hidrográfica das PCH's em cascata do Rio Sapucaí | 97 |
| Figura 30 – Diagrama Esquemática das PCHs do Rio Sapucaí | 97 |
| Figura 31 – Curva de Permanência de Vazões Médias para a PCH Dourados e PCH São Joaquim | 104 |
| Figura 32 – Curva de Permanência de Vazões Médias para a PCH Palmeiras e PCH Retiro | 104 |
| Figura 33 – Curva característica de descarga do canal de fuga da PCH Dourados . | 107 |
| Figura 34 – Curva característica de descarga do canal de fuga da PCH São joaquim | 107 |
| Figura 35 – Curva característica de descarga do canal de fuga da PCH Palmeiras . | 107 |
| Figura 36 – Curva característica de descarga do canal de fuga da PCH Retiro . . . | 107 |
| Figura 37 – Curva de permanência das alturas médias disponíveis da PCH Dourados | 111 |
| Figura 38 – Curva de permanência das alturas médias disponíveis da PCH São Joaquim | 111 |
| Figura 39 – Curva de permanência das alturas médias disponíveis da PCH Palmeiras | 112 |
| Figura 40 – Curva de permanência das alturas médias disponíveis da PCH Retiro . | 112 |
| Figura 41 – Relação de Eficiência do Gerador: Potência vs Eficiência PCH Dourados | 124 |
| Figura 42 – Relação de Eficiência do Gerador: Potência vs Eficiência PCH São Joaquim | 124 |
| Figura 43 – Relação de Eficiência do Gerador: Potência vs Eficiência PCH Palmeiras | 125 |
| Figura 44 – Relação de Eficiência do Gerador: Potência vs Eficiência PCH Retiro . | 125 |
| Figura 45 – Relação de Eficiência turbina: Vazão turbinada vs Altura de Queda líquida da PCH Dourados | 125 |
| Figura 46 – Curva Colina da Turbina da PCH Dourados | 125 |
| Figura 47 – Relação de Eficiência turbina: Vazão turbinada vs Altura de Queda líquida da PCH São Joaquim | 126 |
| Figura 48 – Curva Colina da Turbina da PCH São Joaquim | 126 |
| Figura 49 – Relação de Eficiência turbina: Vazão turbinada vs Altura de Queda líquida da PCH Palmeiras | 127 |
| Figura 50 – Curva Colina da Turbina da PCH Palmeiras | 127 |

| | |
|--|-----|
| Figura 51 – Relação de Eficiência turbina: Vazão turbinada vs Altura de Queda líquida da PCH Retiro | 127 |
| Figura 52 – Curva Colina da Turbina da PCH Retiro | 127 |
| Figura 53 – Histograma de Resíduos (PCH São Joaquim) | 130 |
| Figura 54 – Gráfico Q-Q Resíduos (PCH São Joaquim) | 130 |
| Figura 55 – Resíduos vs Valores Ajustados (PCH São Joaquim) | 131 |
| Figura 56 – Histograma de Resíduos (PCH Palmeiras) | 133 |
| Figura 57 – Gráfico Q-Q Resíduos (PCH Palmeiras) | 133 |
| Figura 58 – Resíduos vs Valores Ajustados (PCH Palmeiras) | 134 |
| Figura 59 – Histograma de Resíduos (PCH Retiro) | 135 |
| Figura 60 – Gráfico Q-Q dos Resíduos (PCH Retiro) | 136 |
| Figura 61 – Resíduos vs Valores Ajustados (PCH Retiro) | 136 |
| Figura 62 – Convergência dos objetivos normalizados para março a junho de 2024 . | 137 |
| Figura 63 – Convergência dos objetivos normalizados para julho a outubro de 2024 | 138 |
| Figura 64 – Convergência dos objetivos normalizados para novembro e dezembro de 2024 | 139 |
| Figura 65 – Convergência dos objetivos normalizados, para o Sistema de PCHs em cascata para meses de março a outubro do ano de 2024 | 140 |
| Figura 66 – Frente de Pareto com os 500 melhores indivíduos para o Sistema de PCHs em cascata para meses de março a outubro do ano de 2024 . . . | 141 |
| Figura 67 – Comparação da soma de Potência Real e potência obtida pelo NSGA II) | 143 |
| Figura 68 – Frequência de soluções para o intervalo de altura operacional (PCH Dourados) | 144 |
| Figura 69 – Frequência de soluções para o intervalo de altura operacional (PCH São Joaquim) | 144 |
| Figura 70 – Frequência de soluções para o intervalo de altura operacional (PCH Palmeiras) | 144 |
| Figura 71 – Frequência de soluções para o intervalo de altura operacional (PCH Retiro) | 144 |
| Figura 72 – Frequência de soluções para o intervalo de vazão operacional (PCH Dourados) | 146 |
| Figura 73 – Frequência de soluções para o intervalo de vazão operacional (PCH São Joaquim) | 146 |
| Figura 74 – Frequência de soluções para o intervalo de vazão operacional (PCH Palmeiras) | 146 |
| Figura 75 – Frequência de soluções para o intervalo de vazão operacional (PCH Retiro) | 146 |

Lista de tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 – Capacidade de Geração do Brasil - Matriz Energética | 32 |
| Tabela 2 – Problema de Otimização em fontes de Energia Renováveis | 35 |
| Tabela 3 – Variáveis utilizadas nos estudos energéticos | 98 |
| Tabela 4 – Dados Simulados de Ensaio da Turbina da PCH Dourados | 99 |
| Tabela 5 – Dados Simulados de Ensaio da Turbina da PCH São Joaquim | 99 |
| Tabela 6 – Dados de ensaio em comissionamento da Turbina da PCH Palmeiras . | 100 |
| Tabela 7 – Dados de ensaio em comissionamento da Turbina da PCH Retiro . . . | 101 |
| Tabela 8 – Postos Fluviométricos | 101 |
| Tabela 9 – Vazões médias mensais das estações fluviométricas considerados para as PCH Dourados e São Joaquim | 102 |
| Tabela 10 – Vazões médias mensais das estações fluviométricas consideradas para PCH Palmeiras e Retiro | 103 |
| Tabela 11 – Vazão <i>vs</i> Cota medida na PCH Dourados | 105 |
| Tabela 12 – Vazão <i>vs</i> Cota medida na PCH São Joaquim | 105 |
| Tabela 13 – Vazão <i>vs</i> Cota medida na PCH Palmeiras | 105 |
| Tabela 14 – Vazão <i>vs</i> Cota medida na PCH Retiro | 105 |
| Tabela 15 – Coeficiente de Determinação das PCHs em estudo. | 108 |
| Tabela 16 – Altura disponível (H) para PCH Dourados. | 108 |
| Tabela 17 – Altura disponível (H) para PCH São Joaquim | 109 |
| Tabela 18 – Altura disponível (H) para PCH Palmeiras | 109 |
| Tabela 19 – Altura disponível (H) para PCH Retiro | 110 |
| Tabela 20 – Coeficientes da função de eficiência da turbina das PCHs | 115 |
| Tabela 21 – Constantes de perda de carga (w) para diferentes PCHs | 116 |
| Tabela 22 – Limites operacionais de vazão por unidades geradoras | 117 |
| Tabela 23 – Limites operacionais de altura por unidades geradoras | 118 |
| Tabela 24 – Limites de potência do empreendimento | 118 |
| Tabela 25 – Coeficientes das funções de eficiência dos geradores das PCH em estudo | 119 |
| Tabela 26 – Testes estatísticos da função de eficiência da PCH São Joaquim | 129 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 27 – Resultados de testes estatísticos para validação da equação de eficiência da turbina da PCH São Joaquim | 129 |
| Tabela 28 – Testes estatísticos da função de eficiência da PCH Palmeiras | 132 |
| Tabela 29 – Resultados de testes estatísticos para validação da equação de eficiência da turbina da PCH Palmeiras | 132 |
| Tabela 30 – Testes estatísticos da função de eficiência da PCH Retiro | 134 |
| Tabela 31 – Resultados de testes estatísticos para validação da equação de eficiência da turbina da PCH Retiro | 135 |
| Tabela 32 – Melhores soluções de potência total gerada, custo de O&M e perdas de carga do sistema em cascata das PCHs em estudo para o ano de 2016 . | 142 |
| Tabela 33 – Melhores soluções de altura e vazão obtidas das PCHs em cascata para os anos de 2013 a 2024 | 165 |
| Tabela 34 – Melhores Valores de Potência, Custos de O&M e Perdas de Carga para os anos de 2013 a 2024 | 168 |

Lista de siglas

| | |
|----------------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ABRAGEL | Associação Brasileira de Geração de Energia Limpa |
| AF | <i>Aspect Factor</i> |
| AG | Algoritmo Genético |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| AHs | Aproveitamentos Hidrelétricos |
| BEN | Balanco Energético Nacional |
| BECCS | <i>Bioenergy with Carbon Capture and Storage</i> |
| CGH | Centrais Geradoras Hidrelétricas |
| EMO | <i>Evolutionary Multi-Objective Optimization</i> |
| EOL | Centrais Geradoras Eólicas |
| ESHA | <i>European Small Hydropower Association</i> |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| EMDE | Economias Emergentes e em Desenvolvimento |
| GEE | Gases de Efeito Estufa |
| IRENA | <i>International Renewable Energy Agency</i> |
| IEA | <i>International Energy Agency</i> |
| MOOP | <i>Multi-Objective Optimization Problem</i> |
| MMQ | Método dos Mínimos Quadrados |
| NSGA II | <i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II</i> |
| O&M | Operação & Manutenção |
| ONGs | Organizações Não-Governamentais |

ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico
OM Omnibus
PAES *Pareto Archived Evolutionary Strategies*
PSO *Particle Swarm Optimization*
PCHs Pequenas Centrais Hidrelétricas
PL Projeto de Lei
RDS Relés Direcionais de Sobrecorrente
RMSE *Root Mean Square Error*
SBX *Simulated Binary Crossover*
SIGA Sistema de Informações de Geração
SIN Sistema Interligado Nacional
UFV Centrais Geradoras Fotovoltaicas
UHE Usinas Hidrelétricas
UTE Centrais Geradoras Termelétricas
WETO *World Energy Transitions Outlook*

Lista de símbolos

Símbolos Alfanuméricos

$a_{00}, a_{01}, a_{02}, a_{10}, a_{11}, a_{20}, a_{30}, a_{21}, a_{12}, a_{03}$ - Coeficientes do polinômio de 2ª ordem

a, b, c - Coeficiente da função rendimento do gerador

C_{un} - Custo unitário

E_{tot} - Energia total

e_i - Resíduos

\bar{e} - Média dos resíduos

s - Desvio padrão dos resíduos

n - Número de observação

g - Aceleração devido à gravidade (m/s^2)

h_{Perdas} - Perdas de carga total do sistema hidráulico (m)

H_t - Altura líquida da queda d'água (m)

H - Altura medida da série histórica (m)

H_{oper}^{max} - Limite de altura máxima operacional(m)

H_{oper}^{min} - Limite altura mínima operacional(m)

k - Constante empírica

k_e - coeficiente de perda de carga na tomada d'água

k_g - coeficiente de perda de carga na grade

L - Comprimento da tubulação (m)

n - Coeficiente de *Manning*

N - Tamanho da população

N - Número total de pontos de dados

p_c - Probabilidade de cruzamento

p_m - Probabilidade de mutação

P - Percentual de tempo de excedência

P_{ativa} - Potência ativa gerada no empreendimento (kW)

P_G - Potência do gerador (kVA)

P_T - Potência no eixo da turbina (kW)

P_{in} - Potência de entrada no gerador

P_{min} - Potência mínima operacional do gerador (kW)

P_{max} - Potência máxima operacional do gerador (kW)

Q_{af} - Vazão afluyente

Q_t - Vazão turbinada (m^3/s)

Q_n - Vazão natural

q_r - Vazão remanescente

q_v - Vazão vertida

Q_{turb}^{min} - Limite de Vazão mínima operacional

Q_{turb}^{max} - Limite de Vazão máxima operacional

w_i - Pesos atribuídos as funções objetivo

w - constante de perdas de carga

v - Vetor de coeficientes de ajuste da curva polinomial

X - Matriz coluna

$x_i^{(L)}$ - Valor mínimo da variável x_i

$x_i^{(U)}$ - Valor máximo da variável x_i

y - Vetor que com valores observados

Símbolos Gregos

$\cos \varphi$ - Fator de potência do gerador

η_c - Índices de distribuição para cruzamento

η_m - Índices de distribuição para mutação

$\eta_g(P)$ - Rendimento do gerador

$\eta_t(H_t, Q_t)$ - Rendimento da turbina

ϕ - Ângulo de inclinação da grade;

ρ - Massa específica da água (kg/m^3)

Δt - Intervalo de tempo (h)

\hat{y}_i - Valor previsto pela regressão

y_i - Valores observados dos dados

$\bar{\hat{y}}_i$ - Valor médio previsto pela regressão

Símbolos Matemáticos

\geq - Maior e igual

\leq - Menor e igual

$\sum_{i=1}^n$ - Somatório

Operadores Matemáticos

\prec_n - Operador de comparação de aglomeração

\times - Produto

Sumário

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 31 |
| 1.1 | Motivação | 33 |
| 1.2 | Objetivos e Desafios da Pesquisa | 36 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral | 36 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos | 36 |
| 1.3 | Contribuições em Produção bibliográfica | 36 |
| 1.4 | Organização da Tese | 37 |
| 2 | INTEGRAÇÃO DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS NAS POLÍTICAS E REGULAMENTAÇÕES PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA | 39 |
| 2.1 | Considerações Iniciais | 40 |
| 2.2 | Energia sustentável e a Transição Energética | 41 |
| 2.3 | Potencial de PCHs no Brasil | 42 |
| 2.4 | Considerações Finais | 45 |
| 3 | TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO USANDO ALGORITMO GENÉTICO DE ORDENAÇÃO NÃO DOMINADA II | 49 |
| 3.1 | Definição: Conjunto Pareto-ótimo | 51 |
| 3.2 | Algoritmos Genéticos | 52 |
| 3.3 | Algoritmos Genéticos de Ordenação Não Dominada II (<i>Non-Dominated Sort Genetic Algorithms – NSGA II</i>) | 55 |
| 3.3.1 | Distância de Aglomeração (<i>Crowding Distance</i>) | 59 |
| 3.3.2 | Seleção de melhores indivíduos | 61 |
| 3.3.3 | Operadores Genéticos | 61 |
| 3.4 | Aplicação de Otimização na engenharia de energias | 63 |
| 3.4.1 | Por que é importante otimizar os processos de engenharia? | 64 |

| | | |
|-------|--|------------|
| 3.4.2 | Configurações gerais para o processo de otimização | 64 |
| 4 | MODELO DE OTIMIZAÇÃO PROPOSTO PARA PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS EM CASCATA | 67 |
| 4.1 | Geração de Energia Elétrica em Pequenas Centrais Hidrelétricas | 68 |
| 4.1.1 | Eficiência do Conjunto Turbina-Gerador de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH) | 70 |
| 4.2 | Perdas de Carga no sistema hidráulico da PCH | 79 |
| 4.3 | Modelo de Otimização Multiobjetivo para Pequenas Centrais Hidrelétricas em cascata | 80 |
| 5 | ESTUDO DE CASO: PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS (PCHS) EM CASCATA - RIO SAPUCAÍ/SP | 87 |
| 5.1 | Objeto de Estudo | 91 |
| 5.2 | Definição das funções de Eficiência das turbinas das PCHs | 98 |
| 5.3 | Definição da série de vazões médias mensais a partir dos dados diários de vazões nos postos fluviométricos. | 101 |
| 5.4 | Cálculo da altura líquida (H_t) de queda d'água das PCHs em cascata | 104 |
| 5.4.1 | Cálculo da altura disponível (H) | 104 |
| 5.4.2 | Cálculo das Perdas de Carga (h_{perdas}) | 112 |
| 5.4.3 | Cálculo da altura líquida de queda (H_t) | 113 |
| 5.5 | Caracterização e descrição das variáveis do estudo de caso: Funções Objetivo e restrições | 113 |
| 5.6 | Parâmetros usados no NSGA II do modelo proposto | 113 |
| 5.7 | Modelagem Matemática usando o NSGA II para o modelo proposto | 114 |
| 5.7.1 | Formulação do problema de otimização multiobjetivo para cada PCH | 115 |
| 5.7.2 | Formulação do problema de otimização multiobjetivo para as PCHs em cascata | 120 |
| 5.8 | Escolha das melhores soluções pelo Método das Ponderações (<i>Weighted Sum Method</i>) | 121 |
| 6 | EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 123 |
| 6.1 | Curva de Eficiência do gerador em função da potência do empreendimento | 123 |
| 6.2 | Curva colina das turbinas das PCHs em estudo | 124 |
| 6.2.1 | Análise Estatística do Modelo de Regressão para as funções de Eficiência das Turbinas das PCHs estudadas | 128 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 6.3 | Resultados obtidos aplicando o modelo multiobjetivo <i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II</i> (NSGA II) | 136 |
| 6.3.1 | Configurações do computador utilizado para otimização | 136 |
| 6.3.2 | Análise de Convergência | 137 |
| 6.3.3 | Análise das Melhores soluções | 139 |
| 7 | CONCLUSÃO | 147 |
| 7.1 | Principais Contribuições deste trabalho | 148 |
| 7.2 | Proposta para trabalhos futuros | 148 |
| | REFERÊNCIAS | 151 |

APÊNDICES 163

| | | | |
|-------------------|----------|---|------------|
| APÊNDICE A | – | MELHORES SOLUÇÕES OBTIDAS PELO NSGA II | 165 |
|-------------------|----------|---|------------|

Introdução

A quantidade de energia elétrica ofertada desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de um país e na definição dos padrões de vida das pessoas. Devido ao rápido crescimento populacional e à industrialização em todo o mundo, a demanda por energia está aumentando rapidamente (SINGH; NATH, 2021). O Brasil dispõe de uma matriz energética bem diversificada, com maior participação de fontes renováveis. O aumento da participação das fontes renováveis de energia no balanço da produção de eletricidade exige a utilização de sistemas de apoio adequados que garantam o seu desenvolvimento sistemático (WALCZAK, 2018).

Em termos de Capacidade Instalada, cerca de 55,1% da energia produzida no Brasil, provém de fontes hídricas, 14,4% da Energia Eólica, 5,8% da energia solar, 8,4% da Biomassa e os outros 15,3% correspondem a energia provinda de fontes não-renováveis e 1% da energia nuclear, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) (2024).

A energia hídrica é produzida, em sua maioria, em grandes Centrais Hidrelétricas distribuídas em rios com grandes volumes de água. À medida em que são utilizados os locais com maior potencial de aproveitamento hidroelétrico, combinado com os crescentes usos concorrentes da água, a expansão do sistema torna-se mais cara e problemática (SCOLA, 2014). Mesmo com o potencial hidroelétrico já utilizado em nosso país, ainda há muito a ser explorado, principalmente em rios de pequeno porte, os quais são afluentes para os grandes rios onde estão instaladas as grandes centrais hidrelétricas do Brasil. Com o decorrer dos anos, a demanda por energia vem estimulando projetos e estudos de novos potenciais e fontes de energia mais limpas e ambientalmente corretas, o que estimulou o incremento na procura pelas PCHs (SANTOS; SILVA; MAGALHÃES, 2010).

De acordo com Art. 5º da Resolução Normativa N° 875, de 10 de março de 2020a um aproveitamento hidrelétrico com potência instalada superior a 5.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW serão enquadrados como PCHs. (Redação dada pela REN ANEEL 1.070, de 29.08.2023)

Segundo os dados do Sistema de Informações de Geração (SIGA) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (ANEEL, 2025c) o Brasil possui cerca de 426 PCHs em

operação, cerca de 25 em processo de construção e 56 como projetos futuros e em estudos de viabilidade. Em termos de Potência fiscalizada em operação, as PCHs ocupam a 5ª posição no Brasil com 5.892.094,17 kW gerados para o Sistema Elétrico Brasileiro, de acordo com dados do primeiro trimestre do ano de 2025 do SIGA. À frente estão as Centrais Geradoras Fotovoltaicas (UFV) com 17.702.441,13 kW, as Centrais Geradoras Eólicas (EOL) com 33.374.653,86 kW, as Centrais Geradoras Termelétricas (UTE) com 47.206.412,36 kW e liderando o ranking as Usinas Hidrelétricas (UHE) com 103.196.493,00 kW. A Tabela 1 mostra as fontes de energia e sua capacidade de geração no Brasil.

Tabela 1 – Capacidade de Geração do Brasil - Matriz Energética.

| Tipo | Quantidade | Potência Outorgada (kW) | Potência Fiscalizada (kW) | Potência Fiscalizada (%) |
|--------------|--------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|
| UHE | 219 | 103.450.901,00 | 103.196.493,00 | 49,09% |
| UTE | 3098 | 56.278.301,95 | 47.206.412,36 | 22,45% |
| EOL | 1660 | 55.565.521,86 | 33.374.653,86 | 15,87% |
| UFV | 21389 | 142.527.525,82 | 17.702.441,13 | 8,42% |
| PCH | 507 | 7.044.027,22 | 5.892.094,17 | 2,80% |
| UTN | 3 | 3.340.000,00 | 1.990.000,00 | 0,95% |
| CGH | 694 | 887.122,04 | 874.026,04 | 0,42% |
| TOTAL | 27570 | 369.093.399,90 | 210.236.120,56 | 100,00% |

Fonte: SIGA ANEEL (2025c)

De acordo com Paes, Costa e Fernandes (2019) as exigências para produção hidro energética nos últimos anos permitiram a criação de um aparato jurídico e fiscal que viabilizou o aumento expressivo de novos Aproveitamentos Hidrelétricos (AHs) no Brasil. Grande parte deles ocorreu pela construção das PCHs com barragens de nível, ou “a fio d’água”. A avaliação geral ou a otimização das PCHs é uma questão particularmente desafiadora porque, via de regra, as PCHs estão localizadas em reservatórios menores ou em rios de pequeno porte, havendo, portanto, problemas relacionados à não uniformidade e grande variabilidade sazonal das condições de vazão (WALCZAK, 2018).

As PCHs possuem uma capacidade inata de partida instantânea, parada, variações de carga etc. e ajudam a melhorar a confiabilidade do sistema de energia, sendo a melhor escolha para atender à demanda de pico (BHATTI *et al.*, 2004; YUKSEL, 2010; SINGH e NATH, 2021). Diferentemente das fontes alternativas como a solar e a eólica que são intermitentes e não conseguem responder a demanda de forma constante. As PCHs, em função de diversas circunstâncias (operacionais, ambientais, de economia de combustível escasso e de custos de investimentos) aliada aos atrativos institucionais a essa participação, podem se apresentar como a alternativa mais conveniente e atraente, tanto do ponto de vista do investidor como do ponto de vista de interesses nacionais (SOUZA; VALENCIO; MAUAD, 2001). Além disso, as Centrais Hidrelétricas em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, podem se tornar mais competitivas ao comercializar as reduções de emissões alcançadas sob a provisão do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (PATRO;

KISHORE; HAGHIGHI, 2022).

1.1 Motivação

Muitos estudos são realizados sobre várias técnicas para a operação de usinas hidrelétricas de grande porte. No entanto, poucos estudos estão disponíveis sobre a operação e o planejamento de PCHs, pois essas usinas utilizam a água de forma direta, que é um sistema complexo em tempo real (SINGH; NATH, 2021). Segundo Tiago Filho et al. (2011) o crescimento das PCHs no Brasil tem sido limitado por mudanças na política e economia do país, que têm sido acompanhadas por certa oposição social por parte de Organizações Não-Governamentais (ONGs). Considerando o contexto de restrições ambientais que o Brasil enfrenta nos últimos anos, em consonância com a garantia de um desenvolvimento sustentável, se faz necessário um olhar diferenciado para tais empreendimentos. Visto que a PCH é uma fonte de energia limpa, renovável que responde bem à demanda de geração de energia em horário de pico de maneira efetiva e rápida, comparada às Termelétricas. Além disso, uma usina hidrelétrica pode ter partida e interrupção de forma rápida, o que ajuda a manter a estabilidade da rede elétrica e atender às flutuações na demanda de energia. E pelas questões de estrutura civil, já que seus reservatórios são pequenos e não alagam grandes áreas produtivas ou cidades ribeirinhas.

Outra questão de motivação desta tese é a de uma indicação de metodologia para operação em cascata de PCHs, similar a operação que já ocorre com as grandes UHE em cascata como é o caso das UHE do rio São Francisco. No caso das PCHs mesmo tendo pequenos reservatórios o simples fato de reter pequenos volumes de água ocasiona uma deficiência considerável na geração instantânea de energia na PCH a jusante. Considerando a operação coordenada, essa problemática acarretará prejuízos menores do que se a PCH estivesse operando individualmente.

É fundamental realizar um monitoramento hidrológico em todo o rio onde se encontram as PCHs em cascata. Isso inclui monitorar os níveis do reservatório, vazão do rio, as chuvas em toda a extensão da bacia hidrográfica e das retiradas para uso consultivo, da evapotranspiração e da própria manutenção do rio. Essas informações serão importantes para que haja um planejamento e operação coordenada entre os operadores das PCHs e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). O ONS garantirá por meio de diretrizes, regulamentações e regras operacionais que a comunicação ocorra de maneira harmoniosa e efetiva, mesmo que as PCHs sejam de concessões diferentes e sejam administradas por empresas distintas. Nesse processo, poderão ser definidas as vazões de água que cada PCH deve liberar ou reter, levando em conta as restrições operacionais, ambientais (escassez, períodos de cheias, dessedentação de animais, agricultura etc.), restrições sociais (uso para as cidades, indústrias etc.). Portanto, a comunicação e ajuste deve ser contínua e flexível tendo em vista as características específicas de cada região. Em resumo essa metodologia

tem por objetivo principal a operação conjunta em cascata para a otimização da produção de energia de cada PCH, de modo que cada uma contribua da melhor forma possível para o suprimento energético garantindo benefícios indiretos em sua operação.

A produção de energia deve assegurar o pleno uso da água para as atividades humanas, irrigação, dessedentação de animais, além de não interferir, ou interferir o mínimo possível, no ecossistema. A indisponibilidade dos recursos hídricos é discutida globalmente, existindo um consenso de que a água é um bem escasso e dotado de alto valor econômico. Esta conformidade deve estar presente em todas as etapas de planejamento, seja econômico, político ou social (SCHARDONG, 2011).

Visando o melhor aproveitamento dos recursos hídricos para a produção de energia, é necessário um sistema de gestão energética na qual se deve considerar os usos múltiplos da água. Com o objetivo de garantir a produção de energia de maneira eficiente e ambientalmente aceita. O sistema, por sua vez, torna-se complexo tendo em vista essas prioridades.

Dessa forma, a produção de energia, dada as variáveis envolvidas, pode ser entendida como um problema multiobjetivo. É necessário considerar além de restrições operacionais, uma série de restrições de natureza econômica, ambiental, cultural e tecnológica que pode ser de difícil tratativa nas técnicas de otimização com uma única função objetivo (SCHARDONG, 2011). Em geral, a otimização multiobjetivo tem várias funções objetivo sujeitas a restrições de desigualdade e igualdade (DEB, 2001).

Conforme definido por Deb (2001) um problema de otimização multiobjetivo tem vários alvos, nos quais alguns devem ser minimizados e outros maximizados. Como no problema de otimização mono-objetivo, aqui também o problema geralmente tem várias restrições, que qualquer solução viável, incluindo a solução ideal, deve satisfazer.

A avaliação geral ou a otimização das PCHs é uma questão particularmente desafiadora porque, na maioria dos casos, estão localizadas em reservatórios menores ou em rios, havendo, portanto, problemas relacionados à não uniformidade e variabilidade sazonal das condições de vazão (WALCZAK, 2018). A geração de energia pode ser aumentada através da otimização de diferentes aspectos de operação da usina, incluindo o ajuste de unidades individuais, a coordenação das operações de unidades múltiplas e os padrões de liberação de água (SINGH; NATH, 2021).

Para a solução de um problema de engenharia onde a variável de estudo é a produção de energia, é preciso entender as diferentes combinações de dados de entrada para gerar determinadas combinações de variáveis de saídas. Além do fato que todo objetivo está acompanhado de determinadas restrições, por exemplo. Na Tabela 2 apresentada por Ferreira (2020) e Iqbal et al. (2014) é possível observar, através de alguns exemplos, as diferentes possibilidades para um problema:

Diversos autores utilizaram modelos de otimização multiobjetivo em seus estudos. Scola (2014) propôs uma abordagem multiobjetivo evolutiva, usando como base o clássico

Tabela 2 – Problema de Otimização em fontes de Energia Renováveis

| Parte do Problema | Diferentes Possibilidades |
|-------------------|---|
| Entradas | Quantidade e tipo de unidades geradoras, condições meteorológicas, modo de operação, rendimento, custos operacionais, vida operacional e tecnologia da fonte renovável. |
| Saídas | Energia gerada, quantidade e capacidade de unidades geradoras, investimento total, confiabilidade da fonte renovável, lucro, combinação das unidades geradoras e tempo de vida |
| Objetivos | Minimizar: custo total do sistema, custo por unidade geradora, investimento, custo de manutenção, emissão de poluição, ruídos, perda de probabilidade de fornecimento de energia; Maximizar: eficiência térmica, geração total de energia, confiabilidade do sistema, lucro, vida útil, rendimento total; |
| Restrições | Ambiental, demanda de carga, econômica/orçamentária, social, probabilidade de fornecimento de energia, vida útil, potência nominal da unidade geradora, limites de fluxo de potência nas linhas de distribuição, unidades geradoras e custos de energia |

Fonte: Adaptado de FERREIRA (p.79, 2020) e IQBAL et al. (2014)

algoritmo NSGA-II para a otimização da operação de sistemas de reservatórios interligados, com múltiplos usos para a água, considerando a geração de hidroeletricidade e o controle da navegabilidade de um trecho de rio. Ferreira (2020) desenvolveu um modelo de otimização multiobjetivo para o dimensionamento da capacidade instalada em PCHs, considerando a maximização do benefício líquido e a maximização da disponibilidade energética. Malagoli (2016) desenvolveu um trabalho que objetivou a otimização multiobjetivo de máquinas elétricas via elementos finitos considerando como objetivos a minimização do volume da máquina e maximização da eficiência energética. Schardong (2011) estudou a aplicação de algoritmos evolucionários na análise multiobjetivo para gestão integrada de sistemas de recursos hídricos. Bernades (2018), fez um estudo de proteção de sistemas elétricos de potência onde utilizou algoritmo meta-heurístico como o *Particle Swarm Optimization (PSO)* e o *NSGA II* para ajustes de operação em Relés Direcionais de Sobre-corrente (RDS). Basu (2008) propôs a aplicação do Algoritmo Genético de Classificação Não Dominada II, como um problema de otimização multiobjetivo, para lidar com o despacho econômico dinâmico de emissões o com objetivos concorrentes e não comensuráveis. A abordagem proposta tem um bom desempenho em encontrar um conjunto diversificado de soluções e em convergir para perto do verdadeiro conjunto pareto-ótimo. Neste contexto o presente trabalho motiva-se na perspectiva de criar material bibliográfico para o estudo de PCH, otimizar a geração de energia de empreendimentos já existentes.

1.2 Objetivos e Desafios da Pesquisa

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia baseada em Otimização Multiobjetivo usando Algoritmos Evolucionários para a operação de Pequenas Centrais Hidrelétricas em cascata de modo a obter o melhor gerenciamento hídrico e melhor cenário possível para a geração conjunta de energia elétrica.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ❑ Criar material bibliográfico para o estudo de gerenciamento de PCHs;
- ❑ Construir um algoritmo multiobjetivo para a geração ótima de energia considerando algumas variáveis e restrições de natureza física e operacional do empreendimento hidrelétrico;
- ❑ Dar continuidade ao estudo de otimização de geração de energia elétrica em PCHs ;

1.3 Contribuições em Produção bibliográfica

O trabalho desenvolvido até aqui, gerou as publicações descritas abaixo:

a) Artigo em Revista Internacional

- ❑ MARTINS DA SILVA, F. W.; CAMACHO, J. R.; FERREIRA, J. H. I. *Analysis of hydraulic losses in the series from 1990 to 2022 at the Retiro small hydroelectric power plant*. Heliyon, v. 10, n. 8, p. e29627, 2024. ISSN 2405-8440.DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e29627. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024056585>>.
- ❑ MARTINS DA SILVA, F. W.; CAMACHO, J. R.; FERREIRA, J. H. I. *Mathematical modeling for the efficiency function of the Retiro small hydroelectric power plant turbine-generator set. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 14259–14277.DOI: <https://doi.org/10.1080/15567036.2024.2416085>.

b) Artigo em Simpósio Internacional

- ❑ MARTINS DA SILVA, F. W.; FERREIRA, J. H. I.; CAMACHO, J. R. *The Role of Small Hydroelectric Power Plants in the Context of the Energy Transition. International Symposium on Energy: Energy Transition, Green Hydrogen and Sustainable Industry, [S. l.]*, v. 1, n. 1, 2023. DOI: 10.55592/ISE.2023.9139974. Disponível em: <<https://publicacoes.softaliza.com.br/ise2023/article/view/4522>>.

c) Artigo em Congresso Nacional

- ❑ MARTINS DA SILVA, F. W.; CAMACHO, J. R.; FERREIRA, J. H. I.; CRUVINEL, J. A. de S. *Integration of small hydroelectric plants in policies and regulations for energy transition*. In: XIV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético: Transição Energética Justa e Sustentável, 2024, Manaus. Anais. p. 1717-1728. ISBN 978-65-992540-2-4.
- ❑ CRUVINEL, J. A. de S;CAMACHO, J. R.; MARTINS DA SILVA, F. W. *Volume Optimization for a Three-Phase EI Reactor 2D Finite Element Method and Genetic Algorithm Approach*. In: XIV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético: Transição Energética Justa e Sustentável , 2024, Manaus. Anais p. 2874-2885. ISBN 978-65-992540-2-4.

d) Capítulo de Livro

- ❑ MARTINS DA SILVA, F. W.; CAMACHO, J. R.; FERREIRA, J. H. I. *Small Hydroelectric Power Plants and hybrid energy production: an approach within the scope of the energy transition In: Pathways to Energy Transition and Sustainability* Santo André: Universidade Federal do ABC, 2024, v.1, p. 47 - 57. ISBN: 978-65-5719-085-2

e) Em processo de elaboração

- ❑ MARTINS DA SILVA, F. W.; CAMACHO, J. R. *A Multiobjective Optimization model using Non-Dominated Sorting Genetic Algorithms for the optimal operation of a Small Hydroelectric Power Plant*. 2025

1.4 Organização da Tese

O Capítulo 1 aborda a relevância crucial da energia elétrica no contexto nacional, com foco especial nas fontes de geração hídrica, incluindo as PCHs. São apresentadas as motivações desta pesquisa, que exploram a operação em cascata de PCHs, além dos objetivos, Contribuições em Produção bibliográfica resultantes do estudo e a estrutura da tese;

O Capítulo 2 apresenta a integração de PCHs nas políticas públicas e regulamentações para a transição energética. E mostra como o potencial de PCHs no Brasil pode ser um grande aliado para um Mundo mais sustentável e menos dependente de combustíveis fósseis;

O Capítulo 3 apresenta os aspectos gerais da otimização Multiobjetivo, com ênfase na proposta de utilização do Algoritmo Genético de Ordenação Não Dominada II

(*Non-Dominated Sort Genetic Algorithms* – NSGA II). Esse capítulo apresenta ainda, a importância de otimizar processos de engenharia de energias;

O Capítulo 4 apresenta a proposta do modelo matemático aplicado a PCHs em cascata, detalhando as funções utilizadas neste estudo. Além disso, são exploradas aplicações de métodos estatísticos para o ajuste e a avaliação dos parâmetros das funções, incluindo o diagnóstico de problemas de normalidade, autocorrelação e a adequação dos modelos de regressão;

O Capítulo 5 apresenta um estudo de caso das PCHs em cascata do Rio Sapucaí Paulista, abrangendo as usinas Dourados, São Joaquim, Palmeiras e Retiro. São desenvolvidas as funções matemáticas do modelo, representando o potencial de geração de energia elétrica, as perdas de carga e os custos de operação e manutenção do empreendimento. Além disso, o capítulo caracteriza e descreve as variáveis do estudo de caso, incluindo as funções objetivo e restrições, os parâmetros utilizados no NSGA-II e a modelagem matemática aplicada ao modelo proposto;

O capítulo 6 apresenta os resultados obtidos, incluindo as curvas de eficiência dos geradores das turbinas das PCHs e a curva colina das turbinas em estudo. Além disso, é realizada uma análise estatística do modelo de regressão para as funções de eficiência das turbinas. Por fim, são destacados os principais resultados da aplicação do modelo multiobjetivo NSGA-II;

O Capítulo 7 apresenta as conclusões do estudo, sintetizando os principais achados e a relevância dos resultados obtidos. Além disso, são destacadas as contribuições da tese para a área de otimização aplicada a PCHs em cascata e potenciais impactos positivos para a operação e planejamento energético. Por fim, são sugeridas direções para pesquisas futuras, abordando possíveis melhorias no modelo proposto, integração com novas técnicas de otimização e aplicação em diferentes cenários hidrelétricos.

Integração de Pequenas Centrais Hidrelétricas nas Políticas e Regulamentações para a Transição Energética

O Brasil, dada sua vasta capacidade na produção de energia limpa e renovável, desempenha um papel importante na transição energética no cenário internacional com vantagens competitivas para figurar como um grande protagonista. O Capítulo 2 busca promover discussões sobre a integração das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) nas políticas públicas de transição energética, visando estimular o progresso, a valorização e a construção de novos empreendimentos hidroelétricos de pequeno porte. A burocracia das políticas ambientais envolvendo a construção das PCHs torna a competição injusta e pouco atrativa aos investidores. Além disso, se busca investigar estratégias para integrar efetivamente as PCHs em sistemas de energia mais amplos, com o objetivo de alcançar metas de sustentabilidade. Para isso, o estudo se baseia no estudo de normas e regulamentações nacional e internacional recentes, além de materiais bibliográficos provenientes de agências de energia do Brasil, como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), dentre outros. Com mais de 90 novos empreendimentos não iniciados no Brasil, é possível que sejam adicionados mais de 1,3 GW de potência ao sistema elétrico. Considerando o vasto potencial inexplorado de PCHs no Brasil esse valor pode ser surpreendentemente maior. Espera-se que as políticas públicas do Brasil incorporem as PCHs no plano de transição energética, destacando a importância dos investimentos no setor para unir esforços na redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).

2.1 Considerações Iniciais

O *World Energy Transitions Outlook* (WETO) da *International Renewable Energy Agency* (IRENA) mostra que o progresso em todos os usos de energia tem sido lamentavelmente inadequado. Os compromissos assumidos na 26ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas mostraram uma tendência promissora, mas ainda ficaram aquém do necessário. Avanços nas políticas do Brasil para a transição energética como o Projeto de Lei (PL) conhecido como *Combustível do Futuro*, que, entre outros tópicos, propõe um conjunto de iniciativas para promover a mobilidade sustentável de baixo carbono e reduzir as metas internacionais de redução das emissões de GEE (MME, 2023).

A matriz elétrica brasileira se destaca no cenário mundial por sua particularidade. Além de ser uma das matrizes mais renováveis do mundo, possui uma característica de integração espacial, por meio de um sistema de longas linhas de transmissão, muito importante para o aproveitamento do potencial de fontes renováveis (EPE, 2023). O Sistema Interligado Nacional (SIN) se estende por mais de 98% do território brasileiro onde engloba sistemas de geração e uma malha de transmissão de energia elétrica interconectada, tudo coordenado de forma centralizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico do Brasil (ONS).

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2024), cerca de 83,70% da capacidade de geração de energia provém de fontes renováveis, e cerca de 15,3% provém de fontes não renováveis, principalmente de combustíveis fósseis, e 1% da Energia nuclear, como mostra a Figura 1. Com o crescimento exponencial na produção de energia solar no Brasil nos últimos anos e os consideráveis investimentos em fontes de energia eólica, observa-se uma tendência em negligenciar aspectos relacionados às PCHs. A participação da hidroeletricidade tem diminuído ao longo do tempo, mas ainda representava um percentual considerável da capacidade de geração (BELLO et al., 2023). Dos 83,70% da capacidade de geração de energia, cerca de 55,1% provém de fontes hídricas, incluindo as PCHs. Embora as fontes de energia solar e eólica sejam fontes limpas e renováveis, sua disponibilidade está sujeita às condições climáticas e à variação sazonal. Isso significa que a geração de energia dessas fontes pode ser inconsistente e imprevisível.

Isso ressalta a importância dos recursos hídricos para a garantia da demanda de eletricidade no Brasil, especialmente por se tratar de uma fonte de energia firme que responde à demanda de maneira instantânea. As PCHs do Brasil representam um importante papel na eletrificação rural e sobretudo na descentralização da produção de energia. Integra a geração hidroelétrica que é a principal fonte de energia do nosso sistema e possui características fundamentais para que possamos passar com maior segurança e robustez por esse novo processo de transição energética (EPE, 2023).

Os efeitos das mudanças climáticas são globais e vão além das fronteiras nacionais (MALISZEWSKA-NIENARTOWICZ; STEFAŃSKI, 2024). A transição para o zero carbono, com o objetivo de alcançar a neutralidade global de carbono, representa um desafio

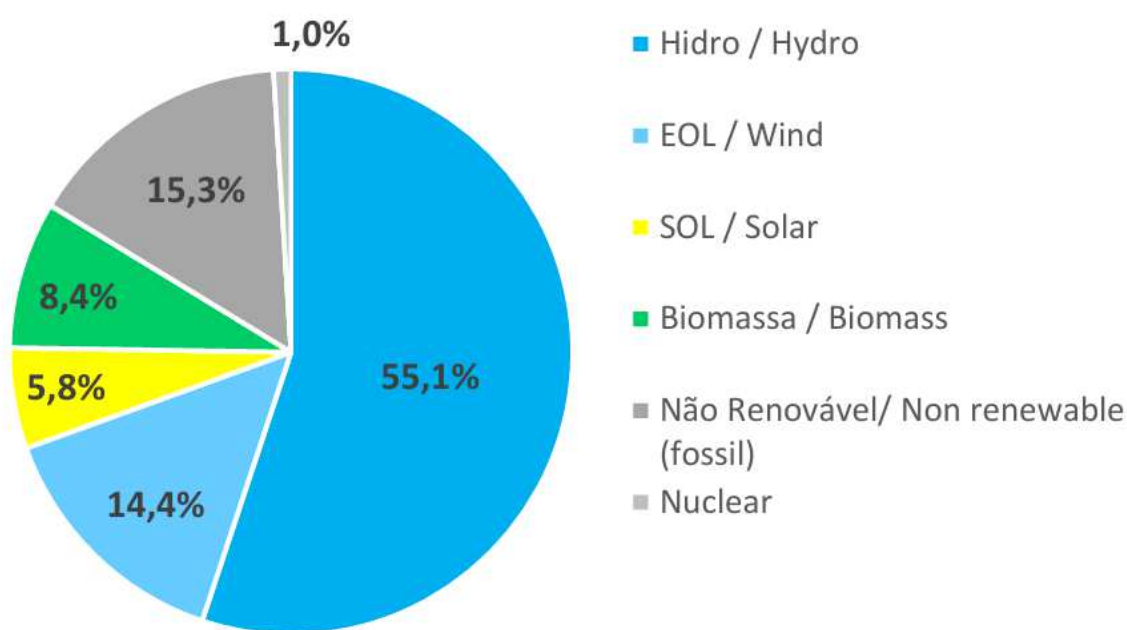


Figura 1 – Participação das fontes na capacidade instalada

Fonte: BEN, (2024)

significativo para a sociedade humana (YU et al., 2024). Bello et al. (2023) ressalta que o cenário da transição energética no Brasil apresenta uma rota tecnológica alternativa que deve alcançar a neutralidade até 2050, considerando os impactos das mudanças climáticas no próprio setor energético e as incertezas das novas tecnologias. O Brasil emerge como protagonista no cenário mundial. Contudo, necessita integrar suas fontes energéticas, abrindo oportunidades de crescimento não apenas na geração de energia solar e eólica, mas também na geração de energia hídrica, especialmente por meio de PCHs. Como as políticas públicas brasileiras podem fortalecer a integração das PCHs no plano estratégico da transição energética?

2.2 Energia sustentável e a Transição Energética

O mundo vive uma nova transição energética, cada vez mais veloz e diversificada, e o setor elétrico brasileiro é um importante agente indutor dessa transição energética (EPE, 2023). O sistema energético necessita-se de uma transformação como pré-condição para o desenvolvimento sustentável e a segurança energética global (IEA et al., 2023). Apesar dos significativos benefícios ambientais e socioeconômicos que a transição energética pode trazer para Economias Emergentes e em Desenvolvimento (EMDE), elas têm recebido níveis desproporcionalmente baixos de investimento (IRENA, 2024). É importante abordar a transição energética com uma estratégia equilibrada e multifacetada (JAIN; KANAAN; MAURER, 2023).

De acordo com o Bello et al. (2023), o Brasil está em um estágio avançado de seu processo de transição energética. Graças à significativa participação de fontes renováveis modernas tanto na matriz elétrica quanto na matriz de combustíveis, o nível de renovabilidade da mistura energética primária do Brasil (49% em 2020) é quase três vezes maior que a média global (14% em 2019), o que coloca o Brasil em uma posição única para se tornar uma economia de baixo carbono.

A análise da IRENA mostra que mais de 90% das soluções compatíveis com um resultado bem-sucedido em 2050 envolvem energias renováveis através do suprimento direto, eletrificação, eficiência energética, hidrogênio verde e bioenergia combinados com a captura e armazenagem de carbono, do inglês *Bioenergy with Carbon Capture and Storage* (BECCS) (IRENA, 2021), como mostra a Figura 2.

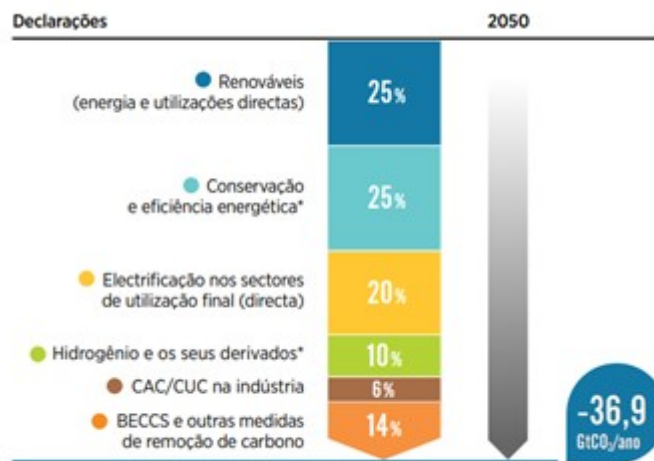


Figura 2 – Reduções das Emissões de carbono sob Cenário 1,5 °C (%).
Fonte: IRENA,(2021)

2.3 Potencial de PCHs no Brasil

Segundo dados de estudo de Empreendimento da ANEEL, 2020, o potencial teórico de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) é estimado em 14 GW, dos quais 5,4 GW estão classificados como "eixo disponível". Os demais encontram-se com Projetos Básicos em fase de desenvolvimento ou já concluídos, conforme a distribuição geográfica apresentada na Figura 3. A EPE destaca que nem todo esse potencial poderá ser efetivamente implementado, devido a possíveis limitações técnicas, econômicas ou ambientais.

O Histograma da Figura 4 mostra a quantidade de PCHs em construção não iniciada, PCHs em construção e PCHs em operação no Brasil até o primeiro trimestre de 2024. Os dados utilizados foram catalogados do Sistemas de Informações de Geração SIGA da ANEEL. Atualmente o Brasil possui 427 PCHs em operação, dessas, cerca de 379 têm potência superior a 3.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW. Nesse mesmo intervalo de

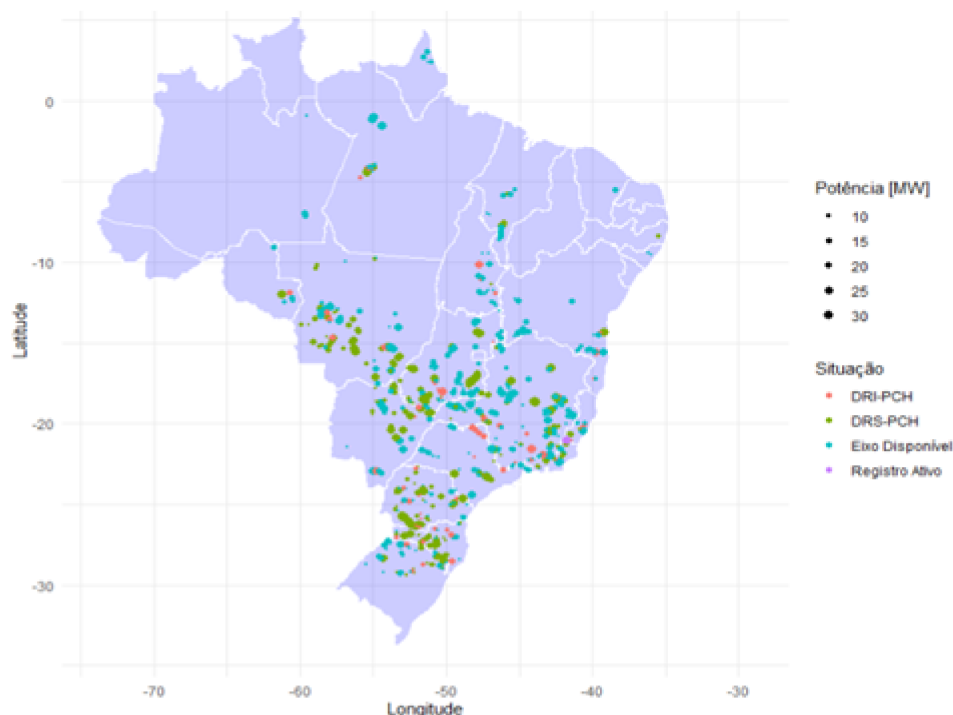


Figura 3 – Localização das PCHs inventariadas e situação dos estudos conforme Resolução 875/2020

Fonte: Elaboração da EPE com dados da ANEEL (2020b)

potência, o país possui cerca de 27 PCHs em construção e outras 67 em construção não iniciada.

Observa-se pelo Histograma da Figura 4 que há mais PCHs em operação na faixa de 3000 kW a 6000 kW. Cerca de 25 PCHs estão na faixa de operação entre 21000 kW e 24000 kW. O Brasil possui cerca de 55 PCHs com a faixa de 27000 e 30000 kW que é o valor máximo da Potência Outorgada para empreendimentos categorizados como PCHs, segundo a Resolução Normativa Nº 673 emitida em 2015 pela ANEEL (ANEEL, 2015)

Considerando as 94 PCHs em construção e em construção não iniciada o sistema pode ser incrementado com uma potência média de 1,3 GW. O que corresponderia a, aproximadamente, 2% potência da matriz elétrica centralizada.

Os prazos de implementação das PCHs, justificado pela intrínseca complexidade das obras civis associadas a cada projeto, representam um dos principais obstáculos para torná-las atrativas para investimentos. Os dados da Figura 5 foram divulgados pela EPE (2023) e mostram os intervalos de implantação entre o início e o fim das obras das PCHs cadastradas para leilão a partir de 2018, sendo possível observar intervalos entre 15 e 30 meses.

O tempo utilizado em etapas como os Estudos de Inventário das PCHs, elaboração de Projeto Básico e obtenção de licença ambiental de instalação não integram o prazo de implantação apresentado, pois são anteriores ao cadastramento (EPE, 2023). Enquanto a construção de uma PCH pode levar mais de quatro anos, considerando os estudos preliminares, obras civis até sua operação, uma usina solar pode ser concluída em questão

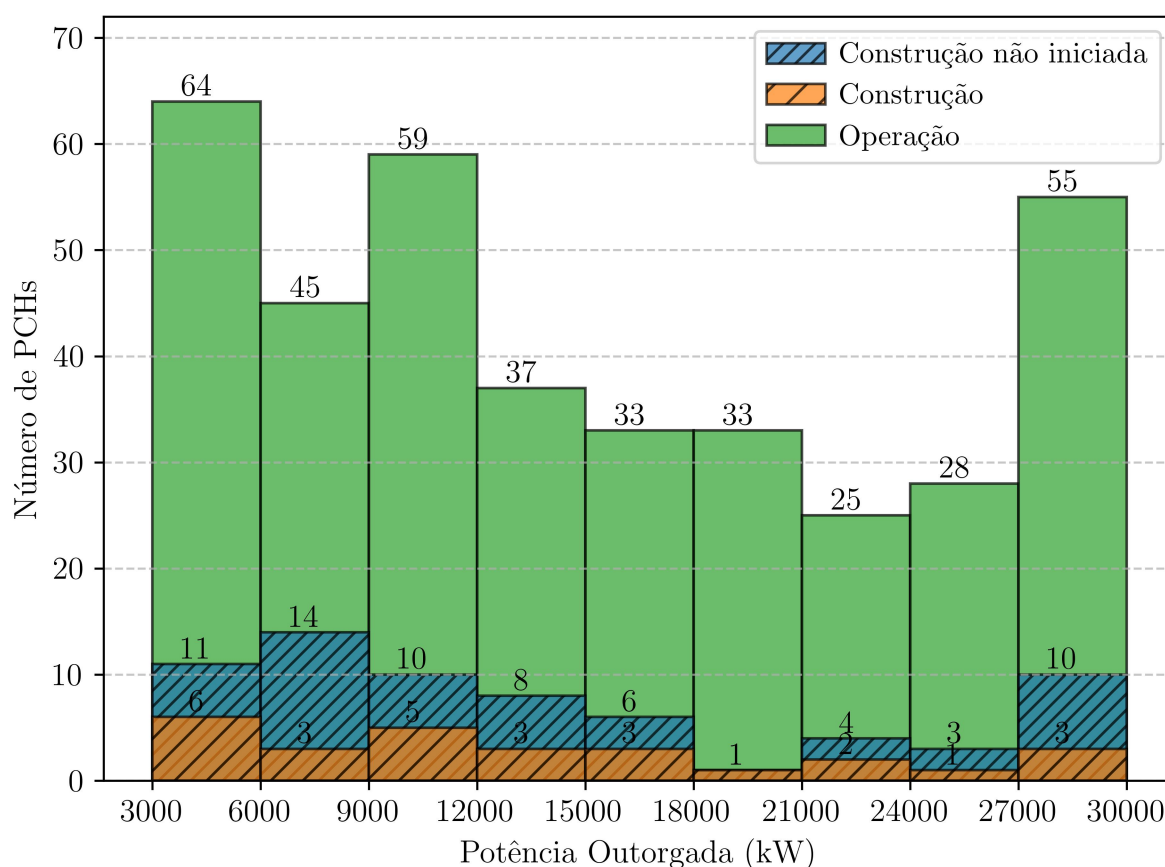


Figura 4 – Números de PCHs em construção não iniciada, em construção e operação
Fonte: Elaboração do autor com dados do SIGA ANEEL (2024)

de meses. É possível que a burocracia associada à implementação de PCHs pode estar relacionada à pouca atratividade para novos investimentos.

A IRENA (2024) de acordo com a Figura 6, aponta algumas ações necessárias à transição energética. As questões relacionadas a Política e Regulação; Cadeias de Suprimento, Competências e Capacidades; Finanças; Colaboração Internacional; Infraestrutura e Operação do Sistema.

É importante que o Brasil coloque a transição energética no cerne das estratégias econômicas nacionais e de desenvolvimento, sem punir as fontes de energias renováveis específicas como as PCHs, de modo a assegurar a ampla participação dessa fonte, em todos os sentidos: Ajustar políticas para apoiar a construção de novos empreendimentos; facilitar o processo de outorga; simplificar as políticas ambientais; estipular regras mais atrativas em leilões de energia e sobretudo adaptar políticas e medidas à realidade do mercado. Segundo a International Renewable Energy Agency (IRENA) (2021) essas políticas devem incluir medidas reguladoras que criam um mercado, bem como incentivos fiscais e financeiros para torná-las mais acessíveis e aumentar sua competitividade de custos em comparação com as soluções baseadas em combustíveis fósseis.

Há uma lacuna na implantação de capacidade de geração baseada em energias reno-

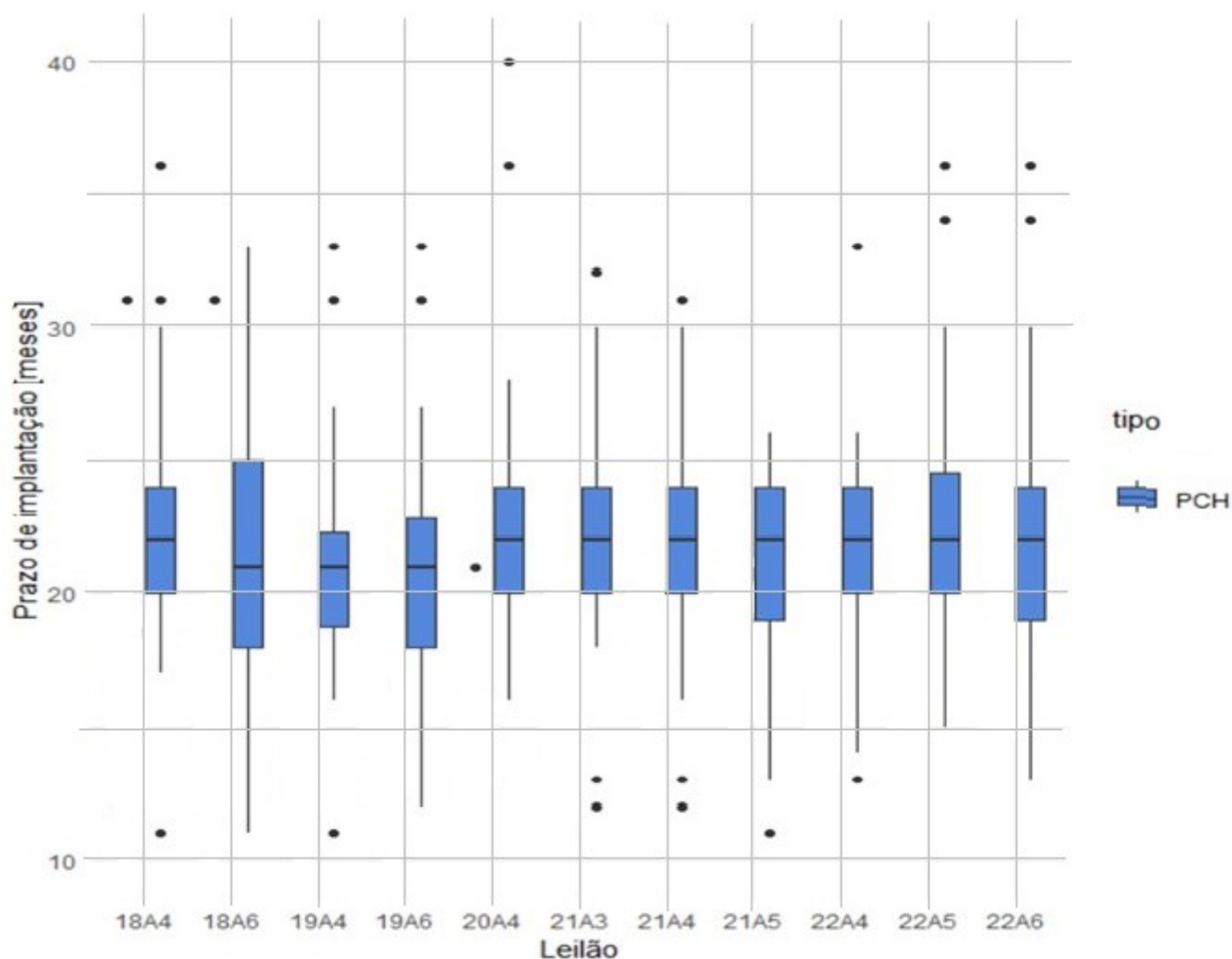


Figura 5 – Prazos de implantação de PCHs

Fonte: Adaptado de EPE (2023)

váveis, de modo específico as PCHs. Isso exigirá políticas e investimentos específicos para garantir que a transição energética seja justa e sustentável a longo prazo (IEA et al., 2023).

2.4 Considerações Finais

O alto potencial para geração de energia solar e eólica no Brasil pode aparentemente indicar que a indústria de energia não enfrentará obstáculos para contribuir com o processo de transição energética. No entanto, alguns desafios estão intrinsecamente associados à agenda de modernização da indústria. A modernização é necessária para alterar como o sistema é operado e como a energia é comercializada. Essas mudanças ajudarão a reorganizar o uso de diversas fontes de energia e promoverão a introdução de novas tecnologias, sem custo adicional ou até mesmo reduzindo o custo, para os consumidores finais (BELLO



Figura 6 – Ações para a transição energética
Fonte: IRENA (2024)

et al., 2023).

Segundo a Associação Brasileira de Geração de Energia Limpa (ABRAGEL) (2024) mais de 60% do potencial global de PCHs permanece inexplorado, oferecendo oportunidade para a expansão dessa fonte de energia limpa, renovável e segura. Enquanto as PCHs produzem energia de forma contínua, com alguns empreendimentos alcançando uma vida útil de mais de 100 anos e oferecendo resposta ágil à demanda, outras fontes de energia têm uma vida útil reduzida. No caso da Energia solar há uma preocupação com o descarte dos materiais e equipamentos quando o empreendimento não for capaz de produzir energia. A energia firme desempenha um papel crucial na estabilidade do sistema elétrico, equilibrando a flutuação na geração de energia das fontes intermitentes. Ela permite que a demanda por eletricidade seja atendida de forma confiável, mesmo quando a geração solar ou eólica é baixa. Portanto é importante investir em uma infraestrutura energética diversificada e equilibrada, que combine diferentes fontes de energia para atender às demandas de uma sociedade moderna.

Com a incorporação de pelo menos 1,3 GW de potência no sistema de energia de forma descentralizada, as PCHs emergem como uma fonte de energia estratégica para o setor elétrico brasileiro. Além disso, podem contribuir de maneira significativa para a diminuição das perdas na transmissão de energia elétrica em longas distâncias, uma vez que, na maioria dos casos, a energia é consumida na região onde é produzida. A construção de novas usinas é realizada de acordo com as metas estabelecidas pelo Plano Decenal de

Expansão de Energia 2029. Até 2029, o governo pretende expandir a capacidade total de PCHs no país de até 30 MW para 9,045 GW (UNIDO, ICSHP, 2022).

Dessa forma, é fundamental considerar políticas públicas direcionadas para uma inserção mais efetiva das PCHs no plano de transição energética. Fornecer incentivos para investimentos em infraestrutura onde existem barreiras de mercado. Principalmente na simplificação de procedimentos de licenciamento para novos projetos de PCHs, sem comprometer avaliações de impacto ambiental e social e garantir que a aceitação pública seja promovida.

Além dessas considerações, a IRENA (2024) propõe outras medidas para uma transição energética. Isso inclui fornecer financiamento público para o desenvolvimento da infraestrutura necessária e estimular o investimento privado. A estratégia envolve aumentar o uso de fundos públicos, implementar políticas que apoiem a viabilidade financeira dos projetos, alavancando tanto capital público quanto privado. Adicionalmente, é importante implementar estratégias de mitigação de riscos e explorar soluções inovadoras, como o financiamento misto. E a importância da cooperação internacional e do financiamento para cumprir a vasta pro-messa da transição energética (IEA et al., 2023).

Técnicas de Otimização Multiobjetivo usando Algoritmo Genético de Ordenação Não Dominada II

Em um problema multiobjetivo não existe uma solução única que otimize cada objetivo, mas sim um conjunto de soluções eficientes, de tal forma, que nenhuma solução pode ser considerada melhor do que as outras para todos os objetivos (VIANNA; PULINI; MARTINS, 2013). A otimização multiobjetivo envolve a melhor solução de várias funções objetivo de forma simultânea. O problema torna-se desafiador quando as funções objetivo a serem otimizadas são claramente antagônicas, ou seja, a solução ótima de uma função objetivo é diferente da outra (DEB, 2011). A abordagem multiobjetivo através da otimização tem sido bem utilizada para resolução de problemas frequentemente conflitantes, como, por exemplo, a maximização das condições de conforto hidrotérmico no ambiente construído sob um mínimo dispêndio de energia, ao lado de um custo mínimo de construção (LINCZUK; BASTOS, 2020).

Conforme definido por Deb (2001) um problema de otimização multiobjetivo tem vários alvos, nos quais alguns devem ser minimizados e outros maximizados. Como no problema de otimização mono-objetivo, aqui também o problema geralmente tem várias restrições, que qualquer solução viável (incluindo a solução ideal) deve satisfazer. A seguir, descrevemos o problema de otimização multiobjetivo do inglês *Multi-Objective Optimization Problem* (MOOP):

Minimizar/Maximizar:

$$f_m(x), \quad m = 1, 2, \dots, M; \quad (1)$$

Sujeito à:

$$g_j(x) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J; \quad (2)$$

$$h_k(x) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, K; \quad (3)$$

$$x_i^{(L)} \leq x_i \leq x_i^{(U)}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad (4)$$

A solução x é um vetor de n variáveis de decisão: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$. O último conjunto de restrições é chamado de limites variáveis, restringindo cada variável de decisão x_i para tomar um valor dentro de um limite inferior $x_i^{(L)}$ e um limite superior $x_i^{(U)}$. Esses limites constituem uma variável de decisão espaço D, ou simplesmente o espaço de decisão.

Por exemplo, sejam as soluções 1, 2, 3, 4 e 5 representadas na Figura 7:

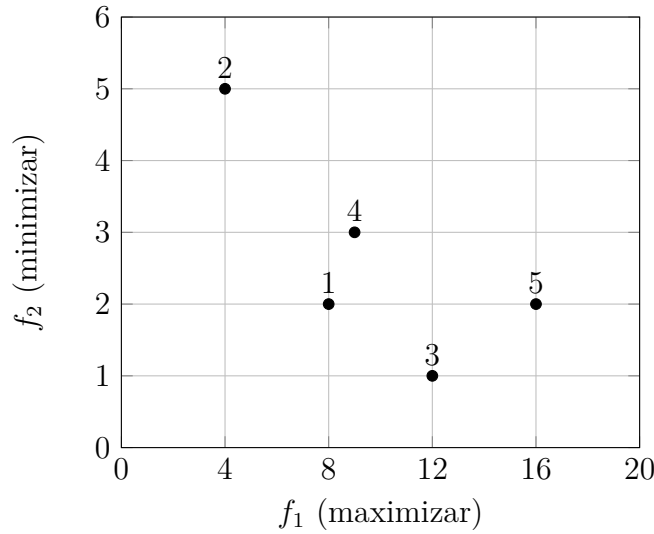


Figura 7 – Conjunto de 5 soluções

Fonte: Adaptado de DEB (2001)

Se compararmos as soluções 1 e 5, observa-se que a solução 5 é melhor que a solução 1 em relação a função objetivo f_1 . Com relação a função objetivo f_2 ambas as soluções (1 e 5) são iguais. Neste caso a solução 5 domina a solução 1. Se fizermos uma comparação entre as soluções 1 e 3. Observaremos que a solução 3 é melhor que a solução 1 em relação a função objetivo f_1 e a solução 3 é melhor do que a solução 1 em relação a função objetivo f_2 . Em ambas as condições de dominação acima são satisfeitas então podemos dizer que a solução 3 domina a solução 1.

Considere um problema de otimização, de acordo com a Figura 8, em que as funções f_1 e f_2 precisem minimizar seus objetivos. Observa-se n soluções possíveis. No entanto aplicando o conceito de otimização é possível definir qual das soluções melhor representaria este problema.

O propósito da otimização multiobjetivo é determinar um conjunto de soluções, denominado conjunto de Pareto ou conjunto Pareto-Ótimo (SCOLA, 2014). Este conceito foi anunciado pela primeira vez por Vilfredo Pareto, em 1896. Na tentativa da busca entre o equilíbrio das diferentes funções objetivo, ocasionará na melhora ou piora de uma ou mais, ou seja, não é possível melhorar uma característica do problema sem piorar a outra. Nesse sentido o conceito de conjunto Pareto-Ótimo não define a função ótima, mas um

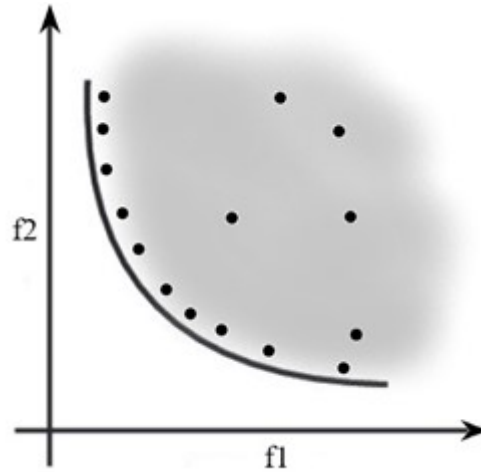


Figura 8 – Frente de Pareto-Ótimo
Fonte: Elaboração do autor, 2025

conjunto de funções que representariam melhor aquele problema. Essa relação de conflito é o que caracteriza a otimização multiobjetivo.

Devido à multiplicidade de soluções, esses problemas foram propostos para serem resolvidos adequadamente por meio de algoritmos evolutivos que utilizam uma abordagem populacional em seu procedimento de busca.

3.1 Definição: Conjunto Pareto-ótimo

Seja P um conjunto de soluções. O conjunto de soluções não-dominadas P_0 , ou Conjunto Pareto-ótimo, é composto por aquelas soluções que não são dominadas por nenhum outro elemento do conjunto P .

Considerando P todo o espaço de busca, ou seja, $P = S$. O conjunto P' de soluções não dominadas é chamada de Pareto-Ótimo (DEB et al., 2002). A Figura 9 mostra as frentes de Pareto com soluções ótimas para diferentes cenários: minimizar f_1 e f_2 ; minimizar f_1 e maximizar f_2 ; maximizar f_1 e minimizar f_2 ; maximizar f_1 e maximizar f_2 .

Por definição uma solução $x(1)$ diz-se que domina a outra solução $x(2)$, se ambas as condições a seguir forem verdadeiras:

- A solução $x(1)$ não é pior do que $x(2)$ em todos os objetivos. Assim, as soluções são comparadas com base em seus valores de função objetivo (ou localização dos pontos correspondentes ($z(2)$ e $z(2)$) no espaço objetivo)
- A solução $x(1)$ é estritamente melhor do que $x(2)$ em pelo menos um objetivo

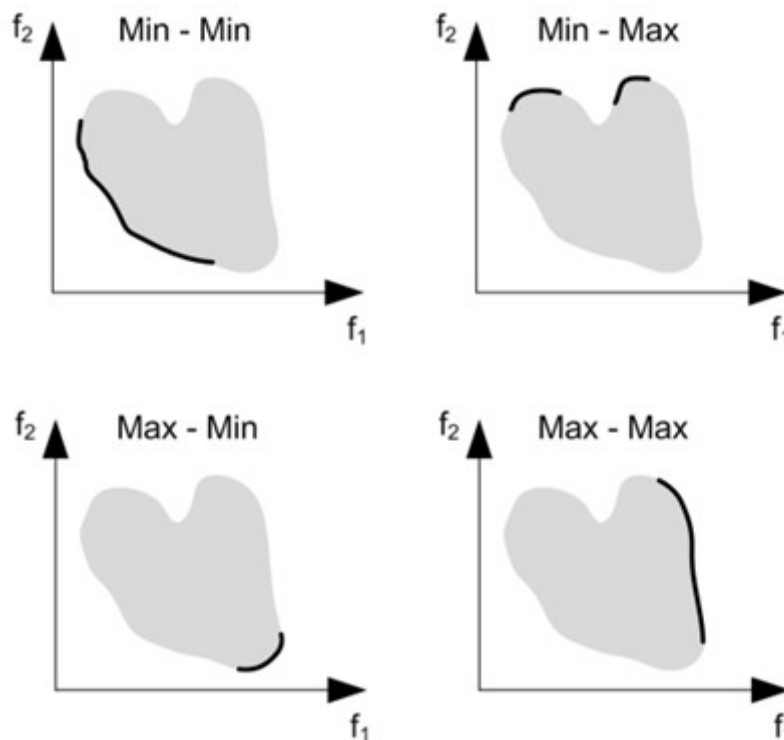


Figura 9 – Solução de Pareto ótima marcada com curvas contínuas para quatro combinações de dois tipos de objetivos f_1 e f_2

Fonte: DEB (2001)

3.2 Algoritmos Genéticos

Algoritmo Genético (AG) são um ramo dos algoritmos evolucionários e como tal devem ser definidos como uma técnica de busca baseada numa metáfora dos processos biológicos (LINDEN, 2006). Algoritmos Genéticos são inspirados no princípio Darwiniano da evolução das espécies e na genética (GOLDBERG, 1989). São algoritmos probabilísticos que fornecem um mecanismo de busca paralela e adaptativa baseado no princípio de sobrevivência dos mais aptos e na reprodução (PACHECO, 1999). Esses conceitos contribuíram para a otimização na resolução de problemas, os quais são suscetíveis à diversos resultados em função das variáveis que os compõem. Obter uma maneira de solucionar um problema de forma otimizada, simplificada, com poucos recursos e obtendo um melhor resultado, revolucionou a comunidade científica possibilitando várias descobertas. A população inicial de indivíduos, isto é o conjunto inicial de *strings*, normalmente é escolhido de forma aleatória. Depois, as populações evoluem em gerações por meio de três operadores (BERNADES, 2018).

- ❑ **Reprodução:** corresponde a um processo pelo qual os indivíduos são copiados para geração futura por meio de uma função de avaliação;
- ❑ **Cruzamento:** corresponde a um operador que atua sobre um par de strings escolhidas aleatoriamente, no cruzamento são transferidos ao descendente o material

genético dos pais;

- **Mutação:** corresponde a um operador que modifica com probabilidade determinada muito baixa, os valores dos genes (alelos) das strings.

A reprodução é um processo no qual sequências individuais são copiadas de acordo com seus valores de uma função objetivo F (também chamada de função de avaliação - *fitness function*). Intuitivamente, podemos pensar na função f como alguma medida de lucro, utilidade ou algum aspecto que queremos maximizar. Copiando as filas (*strings*) de acordo com seus valores de aptidão, isso significa que as sequências de filas (*strings*) com um valor mais alto têm uma maior probabilidade de contribuir geneticamente com um ou mais filhos na próxima geração. Este operador, é claro, é uma versão artificial da seleção natural, mimetizando a sobrevivência darwiniana do mais apto (GOLDBERG, 2002).

O processo de cruzamento (*crossover*) recebe este nome porque fisicamente um cromossomo se cruza com outro para realizar sua operação (LINDEN, 2006). Esta operação é responsável por realizar a troca genética dos pais, aplicando uma probabilidade de ocorrência p_c .

Para garantir a diversidade genética aplica-se uma mutação (*mutation*) no processo de cruzamento de tal modo que um gene é modificado de forma aleatória. A mutação do tipo bit a bit é um operador genético em AG com codificação binária, que consiste em alterar aleatoriamente um ou mais bits de um indivíduo da população, por exemplo de 0 para 1 ou de 1 para 0. A mutação, assim como o cruzamento, dispõe de uma probabilidade de ocorrência p_m firmado como parâmetro de entrada do AG. Geralmente se utiliza uma taxa de mutação pequena ($0,001 \leq p_m \leq 0,1$) (MARCELINO, 2012). Em um cenário de difícil convergência, a causa pode ser uma pequena diversidade dos indivíduos da população (MATOS, 2018).

O esquema da Figura 10 apresenta a descrição de operação do operador de cruzamento. Inicialmente consideramos o Pai 1 e o Pai 2 com cinco genes no cromossomo, de tal forma que é selecionado um ponto de corte de cruzamento. Definimos uma posição entre dois genes de um cromossomo. Cada indivíduo com n genes contém $n - 1$ pontos de corte, este ponto de corte é o ponto de separação entre cada um dos genes (LINDEN, 2006).

Ao ser sorteado o ponto de corte, os pais são separados em duas partes. Por exemplo o Pai 1 tem dois genes na parte esquerda e três genes na parte direita que são diferentes do material genético do Pai 2, que também foi cortado na mesma proporção.

Com o operador cruzamento são gerados os descendentes 1 e 2 com os genes que contém o material genético de cada pai. Depois que são formados os descendentes, estes são submetidos a uma ação de operador de mutação o qual associa a uma probabilidade de ocorrência, geralmente muito baixa, da ordem de 0,5%. Esta ação garante uma ampla busca no espaço de possibilidades, assegurando assim a introdução de indivíduos diversi-

ficados. Contornando a convergência a ótimos locais, ampliando seu espaço de busca para ótimos globais, evitando que a busca se concentre em ótimos locais prematuramente.

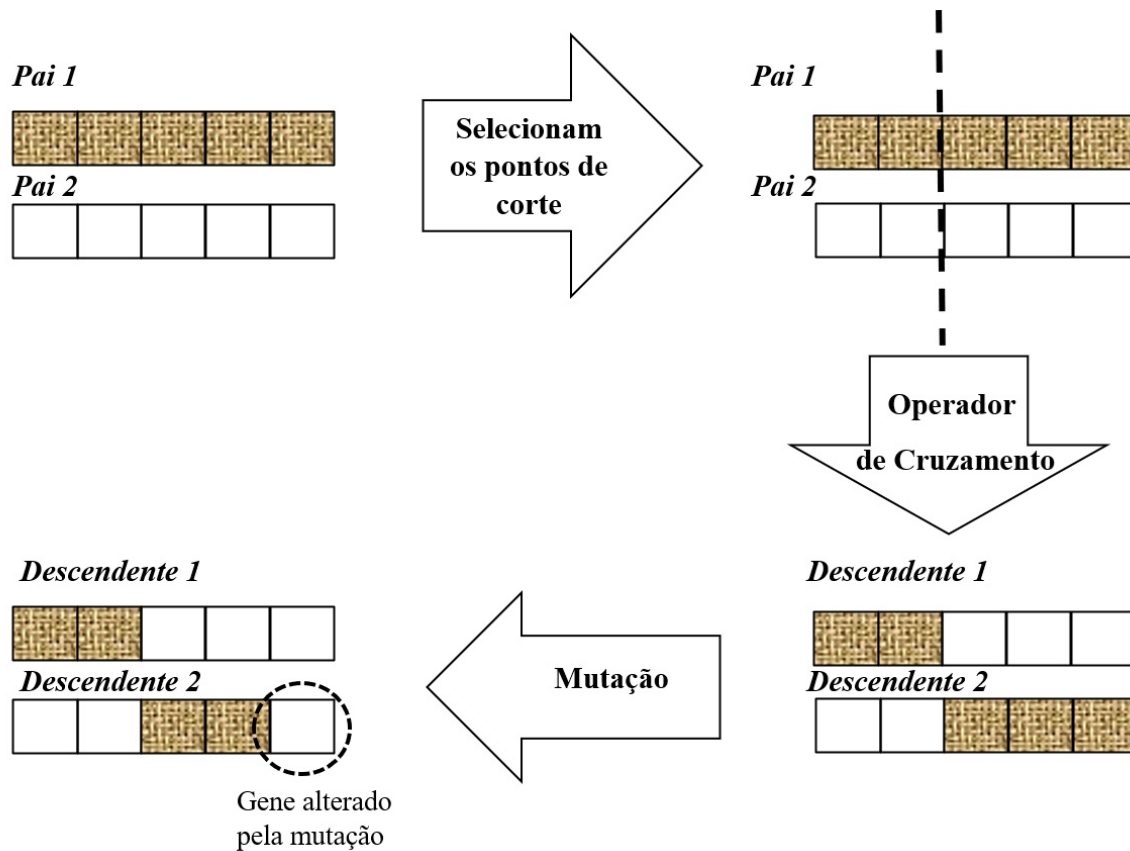


Figura 10 – Descrição do operador de cruzamento de um ponto de mutação

Fonte: Adaptado de LINDEN (2006)

A Figura 11 apresenta um fluxograma de um AG. O algoritmo inicia com um conjunto de soluções candidatas (indivíduos) geradas aleatoriamente. Cada indivíduo da população é avaliado de acordo com uma função de aptidão (*fitness*), que mede sua qualidade como solução para o problema. Os indivíduos mais aptos são selecionados para reprodução. Os métodos mais comuns de seleção incluem torneio, roleta e seleção baseada em *ranking*. Os indivíduos selecionados trocam partes de suas informações genéticas para gerar novas soluções (filhos), combinando características dos pais. São feitas pequenas alterações nos indivíduos para manter a diversidade genética e evitar a convergência prematura para um ótimo local, ou seja, aplica-se uma mutação. A nova população gerada substitui parte ou toda a população anterior, garantindo a continuidade da evolução. O algoritmo verifica se o critério de parada foi atingido, como por exemplo, o número máximo de gerações ou uma solução suficientemente boa. Se sim, o algoritmo retorna a solução final. Caso contrário, o processo retorna à Avaliação e repete as etapas até a condição de parada ser satisfeita.

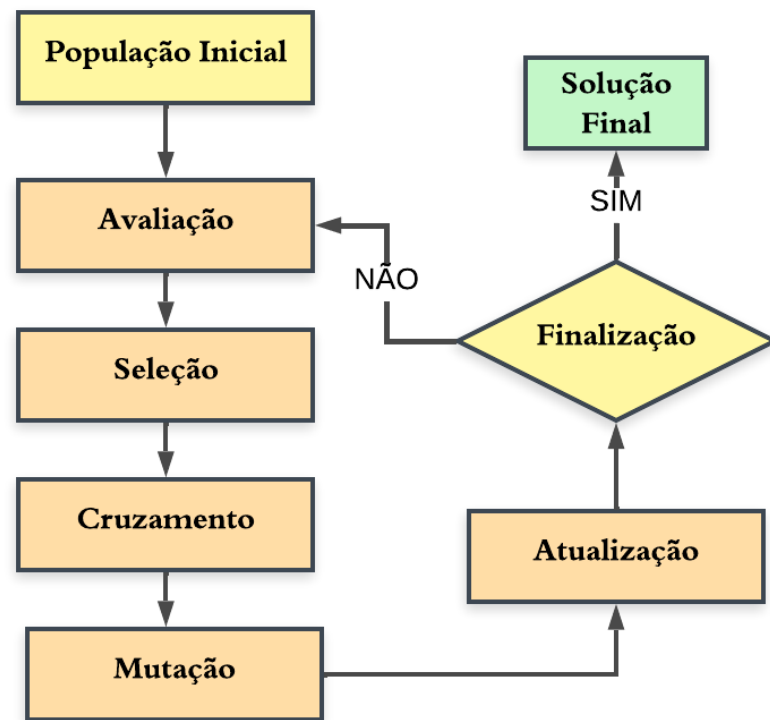


Figura 11 – Fluxograma do NSGA-II

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.3 Algoritmos Genéticos de Ordenação Não Dominada II (*Non-Dominated Sort Genetic Algorithms – NSGA II*)

No NSGA II são utilizados operadores de Algoritmos Genéticos para a geração da população de descendentes a partir da população pai $P(t)$. Esses operadores são nesta ordem: seleção, cruzamento e mutação (SCHARDONG, 2011).

Segundo Handl e Knowles (2006) o procedimento NSGA II é um dos procedimentos de Otimização Multiobjetivo Evolutiva, do inglês *Evolutionary Multi-Objective Optimization* (EMO), popularmente usados que tentam encontrar múltiplas soluções Pareto-ótimas em um problema de otimização multiobjetivo e possui as seguintes características:

- ❑ Utiliza um princípio elitista;
- ❑ usa um mecanismo explícito de preservação da diversidade e ;
- ❑ enfatiza soluções não dominadas

A Figura 12 mostra um esquema ilustrativo do funcionamento de um algoritmo NSGA II demonstrado por Deb et al. (2002). Na Figura 12, $P(t)$ indica a população de pais de

base da geração t e $Q(t)$ a população obtida por meio de operadores genéticos. Essas duas populações são combinadas para formar uma nova geração $R(t)$ de tamanho $2N$. Então essa nova população criada classificará as frentes dominantes F_1 , F_2 , F_3 , F_4 e F_i . Essas frentes definem o tipo de significância que será transmitida para as próximas gerações. O preenchimento começa com a primeira frente de não dominação (da classe um) e continua com os pontos da segunda frente de não-dominância, e assim por diante (DEB, 2011). Como existe um limite de tamanho de $2N$ para a próxima geração nem todas as frentes são transmitidas para a próxima população de filhos $P(t+1)$ resultante da geração $t+1$. Com isso todas as frentes que não foram transferidas para a próxima geração serão rejeitadas.

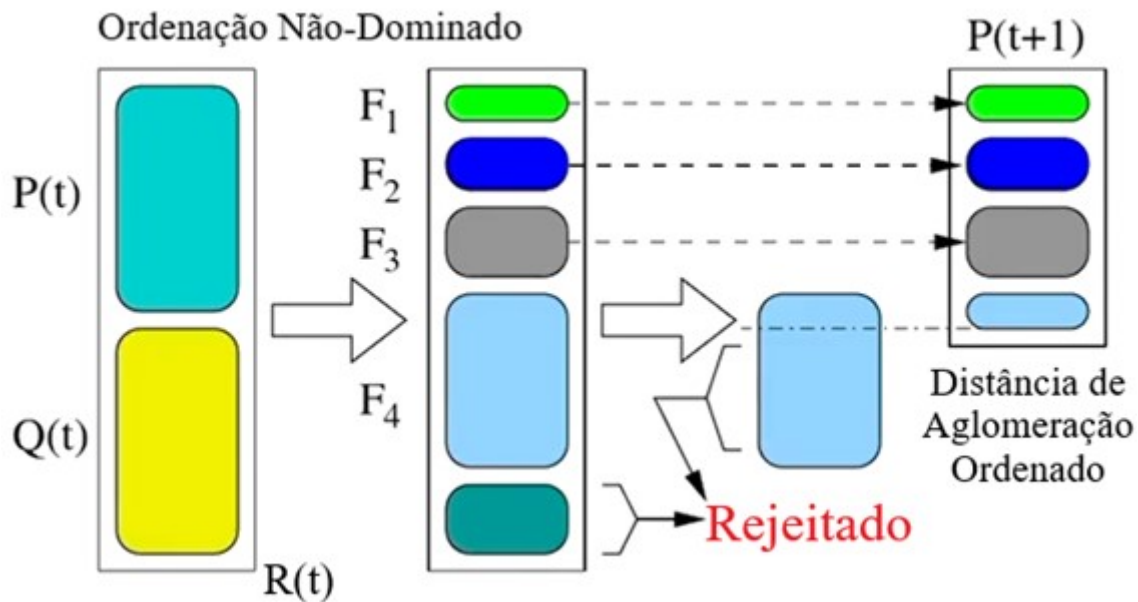


Figura 12 – Esquemático ilustrativo do NSGA-II

Fonte: Adaptado de DEB (2002)

A Figura 13 apresenta o fluxograma do NSGA II, o processo inicia com a geração 0 ($G_{\text{eg}}=0$), em seguida para o processo de avaliação, ou seja, a população inicial é avaliada, e os indivíduos são organizados em frentes de Pareto (Frente=1). A classificação da população é considerada da seguinte forma: Se a população ainda não está completamente classificada, os indivíduos não dominados são identificados para que seja atribuída uma “aptidão fictícia” (*dummy fitness*) para facilitar a seleção. Aplica-se o *Fitness Sharing*, que distribui os valores de aptidão para manter diversidade na população. O índice de frente é atualizado (Frente = Frente + 1) até que toda a população esteja classificada. O critério de parada é estabelecido da seguinte forma: Se o número máximo de gerações foi atingido, o algoritmo termina. Caso contrário, as operações genéticas são aplicadas: Mutação na qual introduz variações nos indivíduos; Cruzamento para gerar novos indivíduos e Seleção (escolha dos melhores indivíduos para a próxima geração). O número da geração é incrementado ($G_{\text{eg}} = G_{\text{eg}} + 1$), e o processo reinicia.

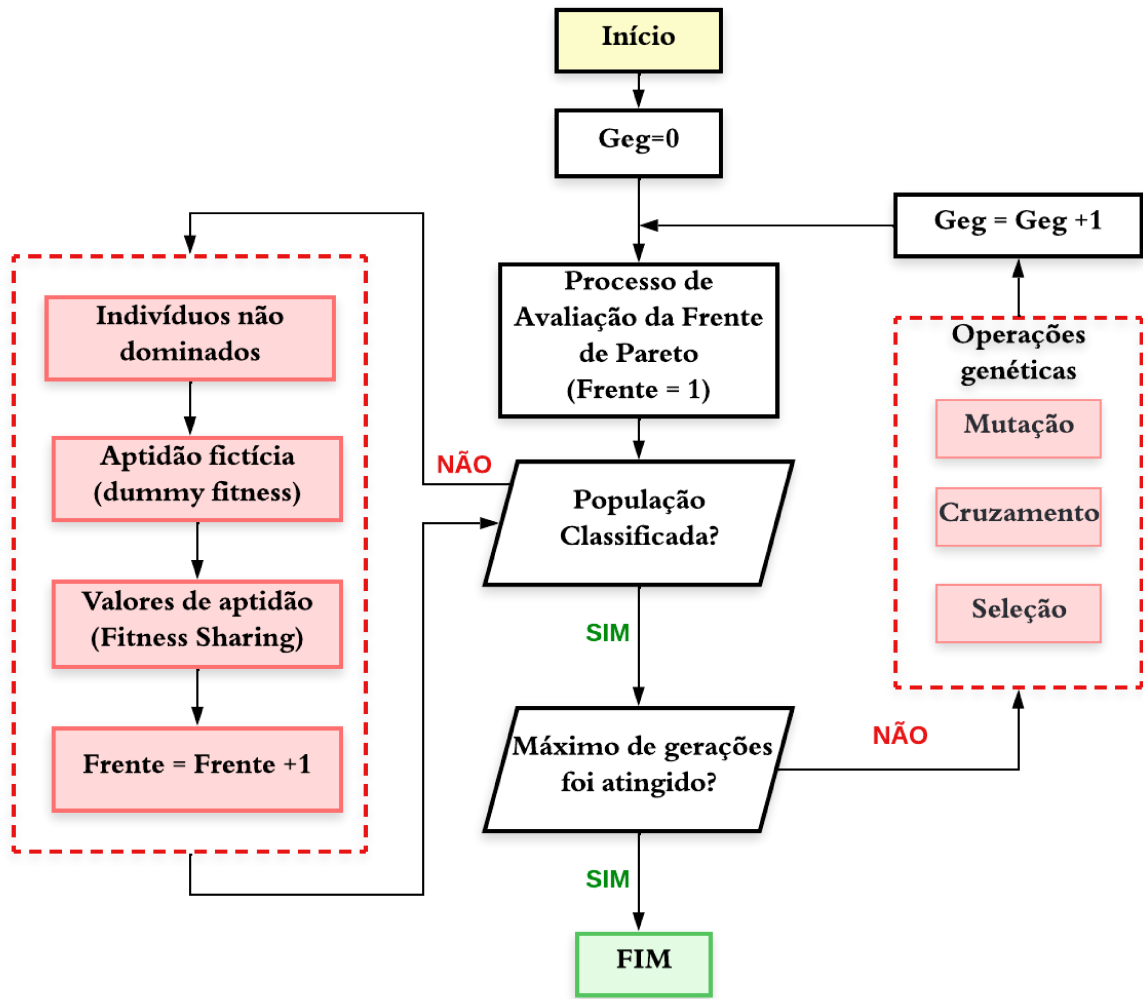


Figura 13 – Fluxograma do NSGA-II

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O *Non-Dominated Sort Genetic Algorithms* proposto por Deb et al. (2002) é um algoritmo de Ordenação não dominada baseada em Algoritmos Genéticos (AG) é representado pelo pseudocódigo do Algoritmo 1.

Conforme Deb et al. (2002) a população inicializada é classificada com base na não dominação. Dizemos que um indivíduo não domina outro se suas funções objetivo não são melhores e, pelo menos, uma de suas funções objetivo seja pior do que a do outro.

Para todos os indivíduos p na população principal P faça:

- ❑ Inicializar $S_p = \emptyset$. O conjunto S_p conteria todos os indivíduos que estão sendo dominados por p . Inicialmente é um conjunto vazio;
- ❑ Inicializar $n_p = 0$. n_p é o número de indivíduos que dominam p .
- ❑ para todos os indivíduos q que pertencem a P , faça:
 - ✓ se p domina q então: adicione q ao conjunto S_p , ou seja, $S_p = S_p \cup \{q\}$

- ✓ se ao contrário, q domina p então: incrementar o contador de dominância para p , ou seja, $n_p = n_p + 1$
 - ✓ Esta condição é finalizada quando não existir dominância.
- Se $n_p = 0$. Então nenhum indivíduo domina p , então p , pertence à primeira frente. Defina a classificação do p individual para um, ou seja, $p_{rank} = 1$. Atualize a primeira frente definida, adicionando q à frente, ou seja, $\mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_1 \cup \{q\}$

Esse procedimento é realizado para todos os indivíduos da população principal P , agrupando-as em diferentes *ranks*, ou seja, em diferentes níveis de dominância as quais podemos chamar de frentes ($\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \mathcal{F}_3$, etc.). Em que, \mathcal{F}_1 contém as soluções não dominadas, \mathcal{F}_2 contém as soluções dominadas apenas por soluções em \mathcal{F}_1 , e assim por diante.

O Algoritmo 1 apresenta a avaliação de aptidão dos indivíduos com a Classificação Rápida Não Dominada.

Algoritmo 1 Classificação Rápida Não Dominada (*Fast Non Dominated Sort -P*)

```

1: for all  $p \in P$  do
2:    $S_p = \emptyset$ 
3:    $n_p = 0$ 
4:   for all  $q \in P$  do
5:     if  $p \prec q$  then
6:        $S_p = S_p \cup \{q\}$ 
7:     else if  $q \prec p$  then
8:        $n_p = n_p + 1$ 
9:     end if
10:  end for
11:  if  $n_p = 0$  then
12:     $p_{rank} = 1$ 
13:     $\mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_1 \cup \{p\}$ 
14:  end if
15: end for

```

O Algoritmo 2 apresenta a Classificação da Frente Não Dominada, ou seja, organiza as soluções em diferentes *ranks*, ou níveis de dominação, além de manter a diversidade do conjunto de soluções ao longo de cada geração.

A primeira frente a ser inicializada com contador: $i = 1$. Enquanto a $i_{ésima}$ frente não é vazia, ou seja, $\mathcal{F}_i \neq \emptyset$, representa um conjunto de soluções em um determinado nível, ou *rank*. Significa que estamos tratando $i = 1$, ou seja, referindo a primeira frente \mathcal{F}_1 .

- O conjunto Q para armazenar os indivíduos para $(i+1)_{ésima}$ frente está inicialmente vazio, ou seja, $Q = \emptyset$;
- Para todos os indivíduos p pertencentes à frente \mathcal{F}_i , faça:

- ✓ para todos os indivíduos q pertencentes ao conjunto de indivíduos dominados por p (S_p), diminua a contagem de dominação para indivíduos q , ou seja, $n_q = n_q - 1$.
- * Se qualquer uma das solução apresentar $n_q = 0$, então nenhum dos indivíduos na frente dominam q . Portanto, defina $q_{rank} = i + 1$. Atualize o conjunto Q com o indivíduo q , ou seja, $\mathcal{F}_i = Q$

Aumenta o contador para a próxima frente em $i = i + 1$. Neste caso após as aplicações dos atributos significa que estaremos procurando a frente \mathcal{F}_2 e assim sucessivamente, até não houver frentes dominadas. Agora o conjunto Q é a próxima frente e, portanto, $\mathcal{F}_i = Q$. Isso significa que \mathcal{F}_i contém todas as soluções não dominadas que pertencem ao próximo nível de dominância.

Algoritmo 2 Classificação da Frente não dominada

```

1:  $i = 1$ 
2: while  $\mathcal{F}_i \neq \emptyset$  do
3:    $Q = \emptyset$ 
4:   for all  $p \in \mathcal{F}_i$  do
5:     for all  $q \in S_p$  do
6:        $n_q = n_q - 1$ 
7:       if  $n_q = 0$  then
8:          $q_{rank} = i + 1$ 
9:          $Q = Q \cup \{q\}$ 
10:      end if
11:    end for
12:  end for
13:   $i = i + 1$ 
14:   $\mathcal{F}_i = Q$ 
15: end while

```

3.3.1 Distância de Aglomeração (*Crowding Distance*)

Para calcular a medida de distância de aglomeração, do inglês *Crowding Distance*, de um indivíduo, deve-se primeiro identificar seus vizinhos adjacentes em cada dimensão (n funções objetivo representam n dimensões). Em seguida calcula-se a diferença dos valores objetivo dos indivíduos adjacentes em cada dimensão. O valor da distância de aglomeração é então a soma dessas diferenças (NETO, 2008).

A distância de aglomeração garante a diversidade dos indivíduos gerados na mesma frente, no caso da ilustração da Figura 14, consideraremos a Frente – F as Soluções não dominadas. Ou seja, o conjunto de soluções ótimas. A Figura 14 representa a distância geométrica dada pelo perímetro do retângulo que envolve a solução.

Ao finalizar a ordenação não dominada é atribuída uma distância de aglomeração. A todos os indivíduos da população é atribuído um valor a essa distância que pode ser

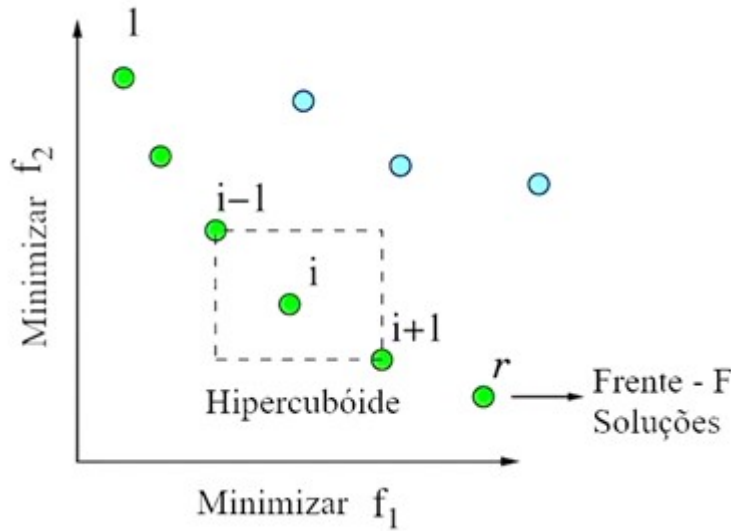


Figura 14 – Cálculo da distância de aglomeração. Os pontos marcados em círculos preenchidos são soluções da mesma frente não dominada

Fonte: DEB (2002)

obtida de acordo com o Algoritmo 3. De forma que os indivíduos são selecionados com base na classificação e nessa distância de aglomeração.

Inicialmente consideraremos quantas soluções pertencem a F , ou seja, a cardinalidade de F ($r = |F|$ representa o número de soluções de F). Para cada solução i pertencente a F , consideraremos a distância $d_i = 0$.

□ Para cada objetivo m , faremos a menor distância de aglomeração. Por exemplo no caso da Figura 14, faríamos, ora considerado a função f_1 , ora considerado a função f_2 .

- ✓ De um modo geral serão classificados os indivíduos na Frente F com base no objetivo m ;
- ✓ Teoricamente consideraremos uma solução $d_i = d_r$ infinitamente grande, o que equivale a dizer que estamos considerando a última solução (extrema solução ótima) que atende a um dos objetivos. Os indivíduos na fronteira são sempre selecionados, pois têm atribuição de distância infinita.
- ✓ Para $i = 2$ até $r - 1$ faça: $d_i = d_i + \frac{|f_m(i+1) - f_m(i-1)|}{f_m^{\max} - f_m^{\min}}$

O Algoritmo 3 apresenta como é determinada a distância de aglomeração no NSGA II. O objetivo principal de obtermos a distância de aglomeração é encontrar a distância euclidiana entre cada indivíduo em uma frente com base em seus m objetivos no hiperespaço dimensional m .

Além de garantir a diversidade do conjunto de soluções não dominadas da frente de Pareto. Uma maior distância de aglomeração tem maior probabilidade de serem selecionadas

para próxima geração evitando uma convergência prematura. A distância de aglomeração, no NSGA II, permite um equilíbrio entre exploração e exploração. Dessa forma a busca mais efetiva em partes mais diversificadas do conjunto Pareto (exploração). E evita que as soluções convirjam em torno de um subconjunto específico de soluções (exploração).

Algoritmo 3 Distância de Aglomeração (F)

```

1:  $r = |F|$ 
2: Para cada  $i \in F$ , considerando  $d_i = 0$ 
3: for cada objetivo  $m$  do
4:    $F = \text{classificar}(F, m)$ 
5:    $d_i = \infty$ 
6:   for  $i = 2$  to  $(r - 1)$  do do
7:      $d_i = d_i + \frac{|f_m(i+1) - f_m(i-1)|}{f_m^{\max} - f_m^{\min}}$ 
8:   end for
9: end for

```

3.3.2 Seleção de melhores indivíduos

A escolha dos melhores indivíduos se dá pela condição de que o algoritmo deve selecionar aqueles mais promissores e diversificados da população. Após a classificação dos indivíduos considerando a não dominação, ou seja, distribuídos em frente de Pareto onde cada indivíduo não exerce nenhuma dominação sobre outro e representam diferentes soluções viáveis para dada as condições do problema de otimização. Com a distância de aglomeração é feita uma seleção com base em um operador de comparação de aglomeração (\prec_n), que define a uma métrica de diversificação (DEB et al., 2002). Esse operador representa um valor limite, em que os indivíduos que possuem uma distância de aglomeração menor são mais promissores e, em tese, são mais diversificados.

Os indivíduos na frente \mathcal{F}_i receberam classificação como $p_{rank} = i$. Considerando a distância de aglomeração $\mathcal{F}_i(d_i)$.

Se $p \prec_n q$ fazer: $p_{rank} < q_{rank}$ ou

Se p e q encontram-se na mesma frente \mathcal{F}_i , então $\mathcal{F}_i(d_p) > \mathcal{F}_i(d_q)$ a distância de aglomeração deve ser maior.

Dessa forma as condições supracitadas garantem que os indivíduos selecionados tenham uma boa classificação em termos de não dominação. No caso, pertençam a frente externa e possuem uma boa diversificação dentro da frente de Pareto.

3.3.3 Operadores Genéticos

Ao adotar a codificação de números reais usa-se um operador ou Simulador Binário de Cruzamento, do inglês, *Simulated Binary Crossover* (SBX) e a mutação polinomial (DEB et al., 2002), (NEBRO et al., 2013).

3.3.3.1 Simulated Binary Crossover (SBX)

Beyer e Deb (2001) apresentaram o SBX, o qual foi desenvolvido com base em observações do que acontece na natureza. É frequentemente utilizado em problemas de otimização multiobjetivo, como o problema utilizado por Basu (2008). Essa técnica permite fazer uma recombinação de dois indivíduos, o qual chamamos de pais $p_{i,k}$, gerando descendentes, ou filhos, com características genéticas dos pais. São criados como uma combinação linear dos valores dos pais, da seguinte maneira: (JAIN; DEB, 2011)

$$C_{1,k} = \frac{1}{2} [(1 - \beta_k)p_{1,k} + (1 + \beta_k)p_{2,k}] \quad (5)$$

$$C_{1,k} = \frac{1}{2} [(1 + \beta_k)p_{1,k} + (1 - \beta_k)p_{2,k}] \quad (6)$$

Onde,

$C_{i,k}$ é o i-ésimo filho com k-ésimo componente;

$p_{i,k}$ é o pai selecionado; e

$\beta_k (\geq 0)$ é uma amostra de um número aleatório gerado com a densidade.

A distribuição de probabilidade pode ser obtida usando as Equações (5) e (6) (DEB; AGARWAL, 1995). Esta função de densidade de probabilidade varia entre 0 e 1. É usado para criar um índice de cruzamento (parâmetro de distribuição η_c) aplicado aos valores dos genes dos pais, o qual será atribuído gerar os genes dos filhos.

A função $p(\beta)$ é definida da seguinte forma:

$$p(\beta) = \frac{1}{2}(\eta_c + 1)\beta^{\eta_c} \quad \text{Para } 0 \leq \beta \leq 1 \quad (7)$$

$$p(\beta) = \frac{1}{2}(\eta_c + 1)\frac{1}{\beta^{\eta_c+2}} \quad \text{Para } \beta > 1 : \quad (8)$$

Esta distribuição pode ser obtida usando uma amostra aleatória $u(0, 1)\eta_c$. Usando a transformação a seguir (BEYER; DEB, 2001):

$$\beta(u) = (2u)^{\frac{1}{\eta+1}} \quad (9)$$

$$\beta(u) = \frac{1}{[2(1 - u)]^{\frac{1}{\eta+1}}} \quad (10)$$

O NSGA II com a estratégia de *crossover* SBX tem grandes vantagens na resolução de problemas complexos de alta dimensão (DENG et al., 2022). A técnica do uso do *crossover* SBX no NSGA II permite a exploração mais eficiente dos espaços de busca. Criando um equilíbrio entre a exploração local e a diversificação da exploração global na busca de soluções ótimas.

3.3.3.2 Mutação polinomial

A mutação é um operador que mantém a diversidade genética de uma população para a próxima população (KATOCH; CHAUHAN; KUMAR, 2021). O papel da mutação em algoritmos genéticos é restaurar material genético perdido ou inesperado em uma população para evitar a convergência prematura do algoritmo genético para soluções sub-ótimas, ela garante que a probabilidade de alcançar qualquer ponto no espaço de busca nunca seja zero (RAGHUWANSHI; KAKDE, 2004). O operador de mutação polinomial sobre um vetor de decisão aplica uma função de distribuição de probabilidade polinomial para gerar um novo vetor de decisão a partir do atual (CARLES-BOU; GALÁN, 2023).

A probabilidade de criar soluções melhores (y_i) que os pais (x_i) é dada pela Equação (11).

$$y_i^{(1,t+1)} = x_i^{(1,t+1)} + (x_i^{(u)} - x_i^{(L)})\delta_i \quad (11)$$

Onde t é o número de gerações, $x_i^{(L)}$ e $x_i^{(u)}$ são respectivamente o limite inferior e superior para o pai x_i .

O parâmetro δ_i é calculado pela distribuição de probabilidade polinomial dada pela Equação (12) (RAGHUWANSHI; KAKDE, 2004), (BASU, 2008).

$$P(\delta) = 0.5(\eta_{m+1})(1 - |\delta|)^{\eta_m} \quad (12)$$

$$\delta_i = \left\{ \begin{array}{l} r_i \end{array} \right. \quad (13)$$

Onde r_i é um número aleatório uniformemente amostrado entre 0 e 1. E η_m é o índice da distribuição de mutação.

3.4 Aplicação de Otimização na engenharia de energias

Os autores Zemero et al. (2019) aplicaram um método de otimização baseado em simulação com o algoritmo *Pareto Archived Evolutionary Strategies* (PAES) objetivando o menor consumo de energia ao menor custo construtivo. Imai et al. (2020) otimizaram um sistema de geração de energia solar fotovoltaica de uma empresa com a finalidade de contribuir com a matriz energética e o desenvolvimento sustentável urbano pela aplicação da modelagem matemática e simulação com o uso do software MATLAB® (versão 2018), por meio da análise de dados meteorológicos e das especificações do sistema de módulos, por um período de 12 meses. Linczuk e Bastos (2020) apresentaram o potencial de uma otimização multiobjetivo orientada para soluções de projeto arquitetônico que contemplem melhores condições de conforto térmico e redução do consumo de energia. Filho

e Carneiro (2004) desenvolveram um modelo de otimização eficiente, flexível e automático para determinar as características de volumes máximo e mínimo do reservatório, a potência instalada e as quedas de projeto e de referência das turbinas.

3.4.1 Por que é importante otimizar os processos de engenharia?

A otimização em processos de engenharia visa reduzir custos, aumentar rendimento e qualidade do processo. Otimizar é encontrar uma solução ótima que descreve determinado processo. Isso é crucial em um ambiente competitivo e com limitações de recursos. A otimização em qualquer aspecto estimula a inovação e desenvolvimento em um mundo dinâmico, competitivo e tecnológico.

Além disso pode impactar positivamente na segurança, dando confiabilidade ao sistema. No caso da Engenharia de Energia onde isso é primordial para a garantia de atendimento à demanda. Tendo em vista que todo o desenvolvimento é resultado do consumo de energia. Todo o processo industrial resulta do consumo de energia elétrica.

3.4.2 Configurações gerais para o processo de otimização

- ❑ Inicialmente é importante entender o problema e identificar as variáveis de entrada, àquelas que modelam o problema. Nesse sentido, é possível entender as condições de saída do problema.
- ❑ Entender as variáveis de saída do problema é essencial para que seja possível identificar quais variáveis de entrada são necessárias atacar, para alcançar o objetivo proposto na otimização. Por exemplo, na geração de energia elétrica de uma PCH, a eficiência da turbina varia de acordo com a vazão turbinada e a altura de queda d'água. Neste caso o operador deve considerar uma combinação ótima para uma melhor eficiência da turbina dentro das condições operacionais e disponibilidade de recursos naturais, no caso a água. Para isso é importante entender qual a relação dessas variáveis com o rendimento da turbina.
- ❑ Desenvolver objetivos e relações matemáticas que modelam e descrevem o sistema com base nas variáveis de entrada, em outras palavras deve-se 'descrever' o problema sob a ótica matemática. Por exemplo em um parque eólico, modelar uma relação de geração de energia em função das variáveis de fluxo de vento, ângulo de ataque das pás, etc.
- ❑ Estipular quais objetivos deve-se alcançar, os quais são limitados por restrições físicas, operacionais, engenharia ou por limitações computacionais. Por exemplo em otimização na geração de energia de parque solar. A temperatura, a irradiância podem ser variáveis limitantes que comprometam a geração de energia;

- Analisar os resultados com base na melhor configuração do sistema, dado o peso em determinado objetivo, se for o caso.

De modo geral, as etapas de otimização podem solucionar problemas relacionados à altos custos, limitações de recursos e tornar um processo viável em aplicações reais. É cada vez mais comum uso de otimização em processos de engenharia e essa ferramenta é uma grande aliada no contexto do desenvolvimento sustentável.

Modelo de Otimização proposto para Pequenas Centrais Hidrelétricas em Cascata

Atualmente o aproveitamento dos recursos hídricos para a produção de energia elétrica se torna cada vez mais desafiador, do ponto de vista ambiental e de outorga por parte dos órgãos regulamentadores. Várias restrições em sua construção, impactos sociais e culturais podem ser associadas a esses empreendimentos. Diante deste contexto se faz necessária a Otimização na geração de energia elétrica de empreendimentos já existentes.

Os problemas de otimização associados a aproveitamentos de pequeno porte, como as PCHs, são bem mais complexos pois uma dada restrição pode interferir no resultado de outra. As funções Objetivo, entram em conflito dado que há interesses distintos envolvidos. A seguir, destacam-se alguns aspectos que reforçam a complexidade de se alcançar uma solução ótima na geração de energia elétrica, sem ignorar outras restrições de caráter físico do empreendimento:

- ❑ A não linearidade que apresenta a produção de energia em função da vazão disponível;
- ❑ os múltiplos usos da água;
- ❑ a capacidade limitada de represar água;
- ❑ a baixa queda d'água.

Dessa forma um modelo multiobjetivo pode apresentar diferentes resultados conforme a importância que é dada pelo operador a cada objetivo específico.

Neste capítulo serão apresentadas as principais características e variáveis de uma PCH, com o objetivo de descrever o modelo matemático que será utilizado nesta pesquisa com apresentação das funções objetivo e respectivas restrições.

4.1 Geração de Energia Elétrica em Pequenas Centrais Hidrelétricas

Não há dúvida que a quantidade de energia elétrica gerada é a variável mais importante em projetos hidroelétricos. A hidrogeração é classificada com base no processo usado para converter a energia cinética liberada (EGRÉ; MILEWSKY, 2002). Em resumo, o processo de geração de energia elétrica, em uma PCH, consiste na conversão de energia mecânica da turbina, produzida a partir da energia cinética da água, em energia elétrica no gerador.

A Figura 15 apresenta o diagrama esquemático simplificado de uma PCH. São destacados seus principais elementos: A barragem para conter o fluxo do rio; o reservatório, que geralmente, é bem pequeno e não comporta grandes volumes de água; a tomada d'água que de acordo com o arranjo do projeto civil, deverão ser previstos um ou mais painéis de grade, com o objetivo de impedir a passagem de detritos carregados pelo escoamento da água, que possam danificar partes da turbina (ELETROBRAS, 2023). Há projetos civis de PCHs que não apresentam condutos forçados, ou canais de adução. Nesses casos a entrada da turbina já começa próximo à tomada d'água que é protegida pela grade; a casa de força, que abriga o gerador, e, finalmente, o canal de fuga onde a água continua seu percurso natural à jusante. Como as PCHs são construídas, geralmente, em rios de pequeno porte, suas quedas d'água são pequenas. Com isso são utilizadas, neste tipo de empreendimento, turbinas de reação de eixo horizontal, como a turbina bulbo por exemplo.

O principal objetivo em um empreendimento de PCH é a geração de Energia Elétrica. Conhecer as variáveis que a determinam, torna-se essencial. Nesse sentido, manipular as restrições de nível d'água, vazão de descarga, eficiência do conjunto eletromecânico, associada ao principal recurso disponível (a água), às condições naturais do rio e à sua sazonalidade tornam-se um desafio para o operador do sistema. Esse objetivo representa a agregação de valor, pois a Energia é o produto a ser comercializado e que produz receita ao sistema.

A função E_{tot} representa a energia total mensal gerada pela PCH. A energia é dependente da produtividade do sistema que é o produto da respectiva eficiência do conjunto Turbina-Gerador, do massa específica da água, da aceleração da gravidade e da altura líquida de queda d'água ($produtividade = \eta_t \eta_g \rho g$), da vazão turbinada (Q_t) e do tempo em horas (Δ_t).

$$E_{tot} = \eta_t \eta_g \rho g Q_t H_t \Delta_t \quad (14)$$

Onde,

η_t é o rendimento médio da Turbina;

η_g é o rendimento médio do gerador;

Δ_t é o intervalo de tempo considerado (horas) em um mês;

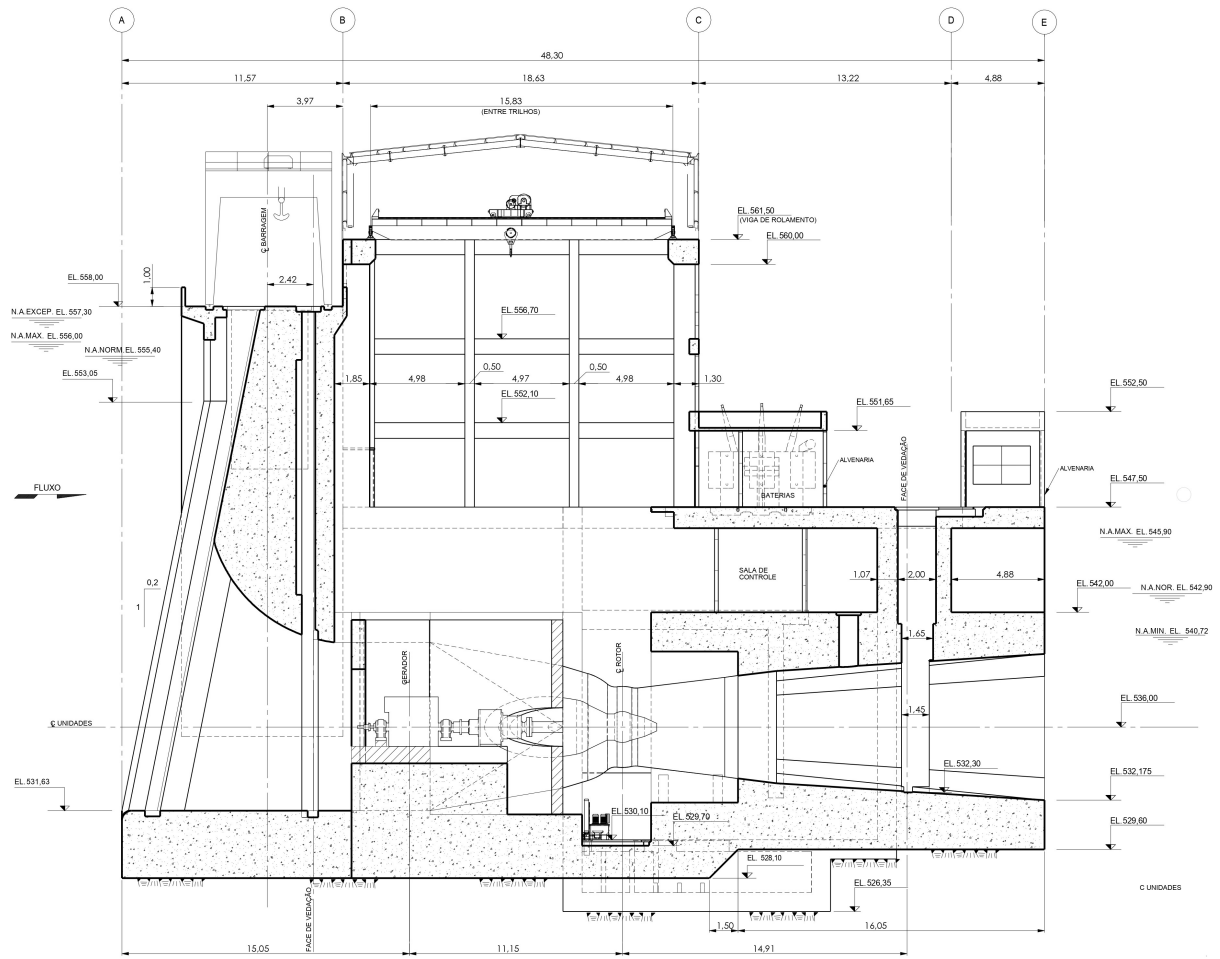


Figura 15 – Esquema simplificado de uma PCH de eixo horizontal
Fonte: ANEEL (2025b)

ρ é o massa específica da água (kg/m^3);

g é a aceleração da gravidade (m/s^2);

H_t é a altura líquida da queda d'água (m);

Tsuanyo et al. (2023) examinou modelos numéricos para o projeto ótimo de usinas hidrelétricas de fluxo livre sem reservatório. Isso é feito com um foco particular no projeto ótimo de um conduto forçado (cálculo do diâmetro e espessura), na seleção e implantação ótimas (cabeça de sucção admissível) de uma turbina, na estimativa da produção de energia para aplicações em rede central e na estimativa do custo de pequenos projetos hidroelétricos. Patro, Kishore e Haghighi (2022) tentou determinar o custo nivelado de geração de eletricidade usando a metodologia de custos ao longo do ciclo de vida, que leva em consideração todos os custos ao longo da vida útil operacional em uma variedade de pequenas usinas hidrelétricas. Yu et al. (2021) desenvolveram um modelo de apoio à tomada de decisão que pode analisar quantitativamente os *tradeoffs* entre a geração de energia hidrelétrica e a projeção do ecossistema fluvial sob diferentes condições hidrológicas.

4.1.1 Eficiência do Conjunto Turbina-Gerador de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH)

A energia elétrica é um insumo muito importante em todos os setores produtivos da sociedade. Ela é considerada um fator-chave na geração de riqueza, desenvolvimento social e melhoria da qualidade de vida em todos os países desenvolvidos e em desenvolvimento do mundo (FERREIRA et al., 2016). No contexto do desenvolvimento sustentável, a geração de energia limpa e renovável é uma tendência global na transição energética. Para isso, compreender a eficiência dos equipamentos de um empreendimento hidroelétrico, pode aumentar a produção de energia, gerando mais lucro e consequentemente adiando a construção de novos empreendimentos, considerando que o aumento de demanda seja um indicativo do desenvolvimento de um país.

Dentre todos os componentes eletromecânicos de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH), a turbina hidráulica¹, sem dúvida, representa um dos componentes de maior importância no empreendimento. A garantia de eficiência na geração de energia está diretamente relacionada ao seu bom desempenho. Não menos importante, o gerador, que está acoplado à turbina possui seu próprio coeficiente de rendimento que é diretamente afetado pelas curvas de rendimento da turbina.

As turbinas hidráulicas utilizadas nas PCH devem ser projetadas de modo a se obter facilidade de operação e de manutenção, dando-se grande importância à sua robustez e confiabilidade, pois a tendência é de que a usina seja operada no modo não assistido (ELETROBRAS, 2023). Em empreendimentos hidroelétricos de pequena queda d'água ou a fio d'água, como é o caso das PCHs, a turbina bulbo² é uma opção muito vantajosa na geração de energia. Segundo Feng et al. (2022) as turbinas do tipo bulbo são capazes de converter a energia do próprio fluxo de água em eletricidade com perdas mínimas e alta eficiência. A Figura 16 apresenta a faixa de aplicação dos principais tipos de turbinas, as quais são escolhidas por sua adequação com base na altura e vazão disponíveis. Observe que para a turbina bulbo a melhor faixa de altura encontra-se entre 2 e 20 metros. Essa característica torna-as uma opção atraente para projetos de PCH.

A turbina hidráulica do tipo bulbo é compacta e autônoma, com o conjunto gerador contido em uma cápsula acomodada na passagem de água. Essa configuração dificulta o acesso ao gerador, embora para unidades pequenas o gerador possa ser removido inteiramente para manutenção (CORNEY et al., 1984). Nos últimos 30 anos, houve grandes melhorias na confiabilidade e facilidade de manutenção. A principal aplicação está na faixa de altura entre 3 e 20 m e saídas de 1 a 50 MW de potência (LEYLAND, 2014).

A Figura 17 mostra uma turbina bulbo típica e são enumerados os seus principais

¹ máquina rotodinâmica com a finalidade de transformar a energia hidráulica em energia mecânica (ABNT NBR 6445/2016).

² turbina de reação, na qual o fluxo d'água penetra axialmente no distribuidor e no rotor, estando o gerador contido em bulbo, diretamente imerso no fluxo (ABNT NBR 6445/2016).

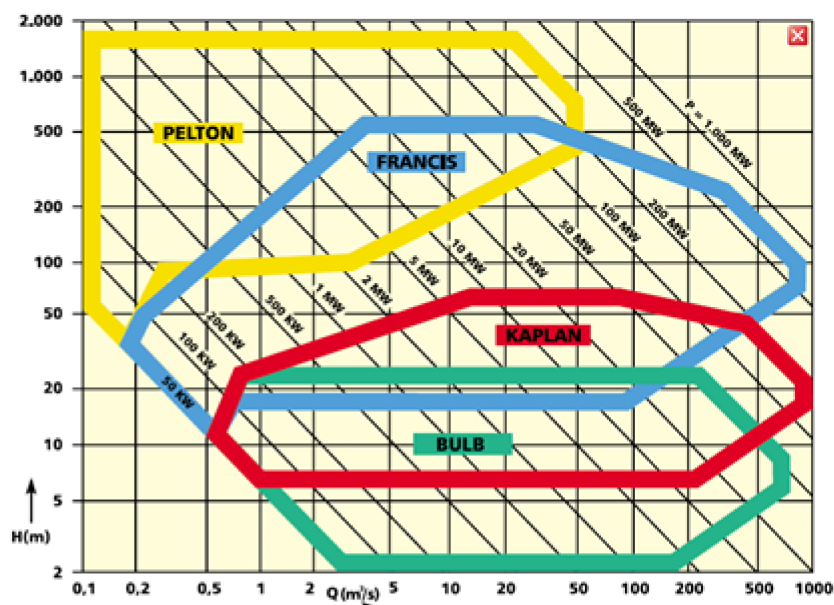


Figura 16 – Gráfico de faixa de aplicação para diferentes tipos de turbinas
 Fonte: Aljaradin, Uamusse e Persson (2017)

componentes segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Onde se destacam: o eixo de acoplamento (1), que transfere a energia mecânica da turbina ao gerador; o mancal de escora (2), que mantém a estabilidade; o mancal de guia (3) conectadas ao mecanismo principal; a vedação do eixo (4) para evitar vazamentos e infiltrações d'água para a tampa da turbina por meio do eixo; o mecanismo de acionamento das palhetas diretrizes (5); as palhetas diretrizes (6) em que sua orientação permite variar a vazão e obter a melhor orientação do fluxo de água nas pás da turbina; o aro da câmara do rotor (7) que é um elemento fixado no concreto, que envolve as pás do rotor; o tubo de sucção (8) que é um elemento que tem por finalidade principal transformar em energia de pressão grande parte da energia cinética remanescente da água ao deixar o rotor e conduzir a água desde a seção de saída do rotor até o canal de fuga ou início de uma nova estrutura hidráulica; o bulbo (9), onde todo o processo acontece e abriga todos os componentes; o gerador (10), que transforma energia mecânica em energia elétrica; o rotor em hélice (11) que é um elemento rotativo constituído por um núcleo central de forma hidrodinâmica, tendo um certo número de pás em forma de hélice fixas. Neste tipo de rotor, o fluxo de água é orientado pelas pás diretrizes de forma a seguir uma direção axial na entrada e na saída e o poço de acesso (12).

Nos estudos preliminares de implantação de PCHs, os engenheiros geralmente apresentam dados de rendimento constante do gerador e da turbina no projeto básico para calcular a energia assegurada pelo empreendimento. Rubanenko et al. (2020) fizeram um estudo da distribuição da geração diária de energia durante o ano de 2019, escolheram a Microcentral Hidrelétrica *Bodnariivska* onde utilizou um valor global de eficiência de turbina entre 0,7 e 0,9. Belik e Nohacova (2019) consideram que a eficiência geralmente

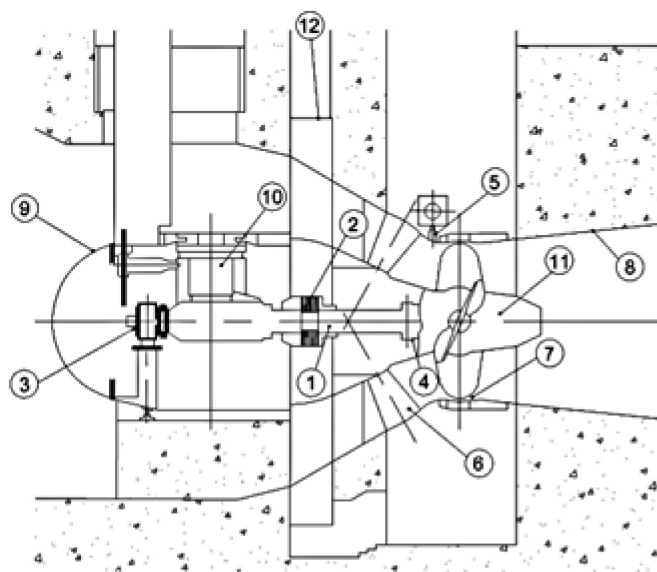


Figura 17 – Turbina Bulbo
Fonte: ABNT NBR 6445/2016

é muito superior a 85%. Enquanto Kovalchuk, Kulyk e Burykin (2012) não utilizaram parâmetros precisos para a eficiência da turbina e considera o valor típico de 75% para eficiências de pequenas usinas hidrelétricas. O rendimento dos equipamentos é comumente representado de maneira simplificada por um valor médio para a usina, na forma de produtividade média (RAMOS; MARCATO et al., 2012), (ARCE; OHISHI; SOARES, 2002). A ANEEL reconhece, por meio de despacho e/ou resolução, um valor médio dos parâmetros da PCH para cálculos de Garantia Física.

Entretanto, diversos autores propõem uma metodologia aplicável a usinas hidrelétricas de grande porte, na qual se considera a eficiência da turbina como uma função do fluxo turbinado e da altura de queda líquida da água no reservatório (DINIZ; ESTEVES; SAGASTIZABAL, 2007), (FINARDI; SILVA; SAGASTIZABAL, 2004), (MÜLLER et al., 2014) (ARCE; OHISHI; SOARES, 2002), o que pode apresentar diferentes valores de acordo com a configuração e combinação desses dois parâmetros. Normalmente, as turbinas hidráulicas são otimizadas para um ponto de operação definido por velocidade, altura e vazão (SINGH; NATH, 2021). O potencial de energia dos reservatórios está associado à altura líquida de queda d'água e/ou devido a energia cinética do fluxo da água, que é convertido em energia mecânica nas turbinas a qual é acoplada a um gerador elétrico no processo de conversão eletromecânica.

O rendimento de uma turbina hidráulica pode ser representado por uma função sob a forma de uma curva, denominada curva de colina. Usualmente, a curva de colina também é apresentada em formato de tabela, de tal forma que alguns pontos de queda líquida e vazão turbinada são escolhidos e o rendimento correspondente a esse par é extraído da curva (EPE, 2013). A curva de colina é construída por medições feitas manualmente, e experimentalmente, em um modelo reduzido da turbina. Os dados obtidos ainda sofrem

normalizações e interpolações para torná-los o mais representativo possível (LAVRADOR; COELHO; SILVA, 2021).

A curva de colina pode ser representada, analiticamente, por um polinômio de segunda ou terceira ordem em função da vazão turbinada (Q) e da Altura líquida da queda d'água (H) (EPE, 2013), (DINIZ; ESTEVES; SAGASTIZABAL, 2007), (MANZANEDO; CASTRO; PEREZ-DONSON, 2000), (SILVA; CAMACHO; FERREIRA, 2024). A expressão genérica do polinômio de segunda ordem é dada pela Equação (15) e de terceira ordem é dado pela Equação (16).

$$\eta_t(H_t, Q_t) = a_{02}Q_t^2 + a_{20}H_t^2 + a_{11}H_tQ_t + a_{01}Q_t + a_{10}H_t + a_{00} \quad (15)$$

$$\eta_t(H_t, Q_t) = a_{00} + a_{10}H_t + a_{01}Q_t + a_{20}H_t^2 + a_{11}H_tQ_t + a_{02}Q_t^2 + a_{30}H_t^3 + a_{21}H_t^2Q_t + a_{12}H_tQ_t^2 + a_{03}Q_t^3 \quad (16)$$

Onde,

a_{00} , a_{10} , a_{01} , a_{11} , a_{20} , a_{02} , a_{30} , a_{21} , a_{12} , a_{03} são os coeficientes do polinômio de 2ª e 3ª ordem, determinados por regressão linear utilizando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).

H_t é a altura líquida da queda d'água (m);

Q_t é a vazão turbinada (m^3/s) e

$\eta_t(H_t, Q_t)$ é o rendimento da turbina em função da altura líquida e vazão turbinada.

Segundo Hidalgo et al. (2014) a eficiência do gerador é uma função da potência de saída, ou seja, seu rendimento é uma função do rendimento do sistema. Em modelos de simulação da operação de usinas hidrelétricas, a não linearidade associada à determinação da altura líquida é implementada sem maiores problemas. Em antigas usinas hidrelétricas ainda em operação, os geradores podem sofrer diminuição da resistência mecânica e deterioração das bobinas de isolamento. Além disso, a ferrugem vermelha pode aparecer nas partes principais dos geradores. Esses incidentes podem modificar seu desempenho (HIDALGO et al., 2014)

De acordo com Manzanedo, Castro e Perez-Donsion (2000), a curva de rendimento do gerador pode ser definida, analiticamente, por um polinômio de grau 2, dependente da potência gerada no sistema. A equação que descreve o rendimento do gerador em função da Potência gerada (P) é dada pela Equação (17):

$$\eta_g(P) = a + bP + cP^2 \quad (17)$$

Onde,

$\eta_g(P)$ é o rendimento do gerador;

a , b e c são coeficientes da função polinomial;

P é a potência ativa gerada no empreendimento (kW).

Segundo a ELETROBRAS (2023), a potência do gerador é determinada após o cálculo da potência disponível no eixo da turbina, através da Equação (18):

$$P_G = P_T \left(\frac{\eta_g(P)}{\cos \varphi} \right) \quad (18)$$

Onde,

P_G é a potência do gerador (kVA);

P_T é a potência no eixo da turbina (kW);

$\cos \varphi$ é o fator de potência no gerador.

Muitos autores apresentaram funções polinomiais e curva de colina para a caracterização de eficiência em empreendimentos hidroelétricos. Manzanedo, Castro e Perez-Donsion (2000) apresentaram uma função, definida por seu diagrama de colina, para modelar sua eficiência com diferentes descargas e alturas. Os mesmos autores apresentaram uma relação polinomial de grau 2, dependente da potência gerada, para o cálculo da eficiência do gerador. Diniz, Esteves e Sagastizabal (2007) estudaram dois modelos matemáticos para a eficiência da turbina geradora. Os coeficientes do modelo foram calculados por uma técnica de regressão linear usando pontos retirados dos conjuntos de níveis de uma curva de colina típica. Para cada modelo, diferentes variantes foram consideradas para satisfazer algumas condições específicas. Junior (2020), apresentou, em seu artigo, os resultados de uma pesquisa exploratória que buscou determinar uma forma geral para a função de rendimento de turbinas hidro geradoras a partir do ajuste de modelos polinomiais à quatro amostras de curva de colina. Detzel et al. (2020) investigaram o esforço adicional dispendido para implementação das curvas de colina em modelos de simulação e verificou que os resultados são realmente melhores ao operador.

No entanto, não se observou nenhum estudo utilizando curva colina e função polinomial para obter a eficiência da turbina para o cálculo e previsão de energia de PCHs. As PCHs surgem como uma opção viável para a geração distribuída, mitigando as perdas na transmissão de energia para os grandes centros urbanos. Além de atender às necessidades de regiões isoladas, ou seja, áreas não conectadas ao sistema de transmissão interligado, elas impulsionam o desenvolvimento de regiões remotas do país (ANDRADE, 2006). A geração de energia oriunda das PCHs mostra uma opção confiável pois sua geração acompanha a sazonalidade dos recursos hídricos, descentralização da geração, menor impacto ambiental. Dessa forma é importante considerarmos estudos mais precisos na geração de energia a partir de fontes renováveis como as PCHs.

4.1.1.1 Ajuste dos parâmetros e avaliação da Função de Eficiência do Conjunto turbina Gerador

Foram utilizados a técnica de regressão polinomial pelo MMQ para obtenção dos coeficientes da Equação (15) e (18) (EPE, 2013), (DINIZ; ESTEVES; SAGASTIZABAL,

2007), (GRIFFITHS; SMITH, 1991) em que é possível ajustar a curva aos pontos observados, com minimização das diferenças entre os valores observados e os valores preditos pela função. De acordo com o sistema de equação linear, dado pela Equação (19). Isso proporciona uma maneira eficiente de compreender as relações entre os dados medidos com a função de ajuste.

$$v = (X^t \cdot X)^{-1} \cdot X^t \cdot y \quad (19)$$

Onde,

v é o vetor de coeficientes que ajusta a curva polinomial aos dados observados, com a forma $a_{00}, a_{10}, a_{01}, a_{11}, a_{20}, a_{02}, a_{30}, a_{21}, a_{12}, a_{03}$ para as Equações (15) e (16). E $[a, b, c]$ para a Equação (18);

X é uma matriz coluna, onde cada coluna representa as potências sucessivas das variáveis independentes (x), ou seja, $X = [1, x, x^2, x^3, \dots, x^n]$, onde n é o grau de ajuste do polinômio;

y é um vetor que contém os valores observados de η_t .

4.1.1.2 Avaliação dos Ajuste dos parâmetros da Função de Eficiência do Conjunto turbina Gerador

Para avaliação da regressão entre os dados medidos e os preditos a partir da aplicação da função de curva colina foi aplicado o critério do Erro quadrado médio, do inglês, *Root Mean Square Error* (RMSE), de acordo com a Equação (20). Para explicar a variabilidade dos dados aplicou-se o Coeficiente de Determinação (R^2) de acordo com a Equação (21). A aplicação do RMSE e o R^2 contribui para entender a precisão do ajuste e o quão bem o modelo se encaixa aos dados.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((\hat{y}_i - y_i)^2)} \quad (20)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{\hat{y}})^2} \quad (21)$$

Onde,

N é o número total de pontos de dados;

\hat{y}_i é o valor previsto pela regressão;

y_i são os valores observados dos dados;

$\bar{\hat{y}}$ é o valor médio previsto pela regressão.

4.1.1.3 Diagnóstico de problemas de normalidade, autocorrelação e ajuste dos modelos de regressão

Para diagnosticar problemas de normalidade, autocorrelação e ajustar os modelos de regressão aplicou-se o Teste de Omnibus (OM), o Teste Durbin-Watson (DW) e o Teste de Jarque-Bera (JB).

A estatística do Teste de Omnibus (OM) é calculada pela Equação (22).

$$OM = \frac{n}{6} \left(\text{Skewness}^2 + \frac{(\text{Kurtosis} - 3)^2}{24} \right) \quad (22)$$

Onde, OM segue a aproximadamente uma distribuição qui-quadrado(x^2) com dois graus de liberdade. A assimetria (*Skewness*) e a Curtose (*Kurtosis*) podem ser calculadas usando a Equação (23) e (24), respectivamente (BAI; NG, 2005).

$$\text{Skewness} = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{e_i - \bar{e}}{s} \right)^3 \quad (23)$$

$$\text{Kurtosis} = \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{e_i - \bar{e}}{s} \right)^4 - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)} \quad (24)$$

Onde,

A O&M de usinas hidrelétricas é um aspecto importante para seu funcionamento eficiente e longa vida útil. Práticas adequadas de O&M são fatores críticos na manutenção da saúde da usina (KUMAR; SAINI, 2022). No caso das PCHs o custo de O&M é muito subjetivo e específico porque envolve diversas variáveis como manutenção nas barragens, nos sistemas eletromecânicos e hidráulicos, sistemas auxiliares da usina, sistema de automação/monitoramento e controle, pagamento de mão de obra, dentre outros. Cada usina hidrelétrica é única devido ao seu tamanho, localização, idade, configuração, propósito, ambiente, equipamentos e vários outros fatores. Portanto, torna-se difícil criar um manual de operações e manutenção (O&M) aplicável a todos os casos (MAKERS, 2020).

A EPE (2023) divulgou a Nota Técnica EPE/DEE/026/2023-R0 que mostra a relação de custos operacionais, a evolução dos custos com valores fixos e variáveis, em R\$/kW.ano, de O&M das PCHs e CGHs de acordo com a Figura 18 e Figura 19, respectivamente. Dado que os custos de O&M podem variar conforme o tamanho dos projetos, a faixa de valores para O&M fixo é mais ampla do que para os custos variáveis, incluindo valores nulos quando as estimativas foram feitas com base variável. Nos últimos anos, observou-se uma certa estabilidade na mediana dos valores tanto para os custos de O&M fixo quanto para os custos de O&M variáveis (EPE, 2023).

Segundo a IRENA (2012), os custos anuais de operação e manutenção são frequentemente citados como uma porcentagem do custo de investimento por kW/ano. Os valores

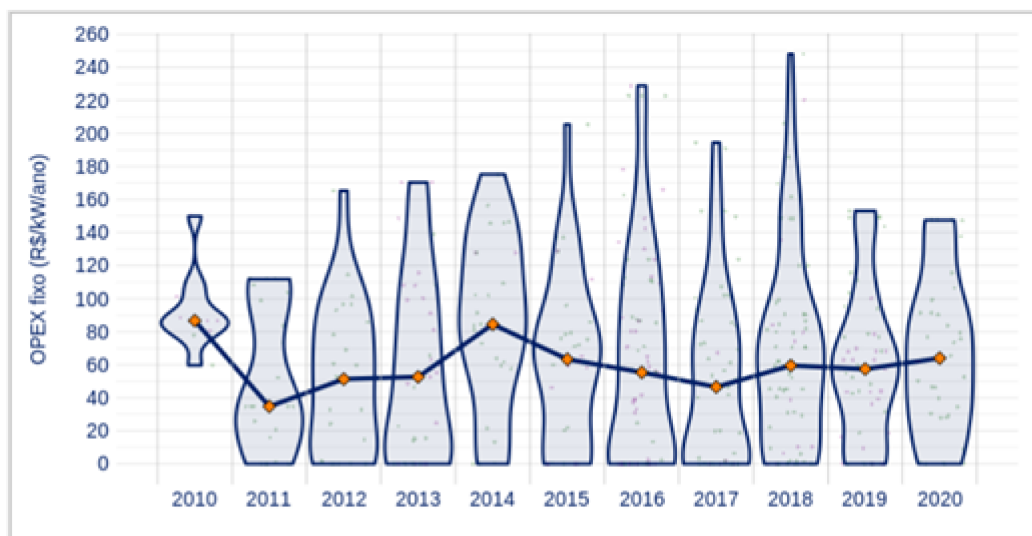


Figura 18 – Evolução dos valores de O&M fixo, em R\$/kW.ano de projetos de PCH e CGH

Fonte: EPE (2023)

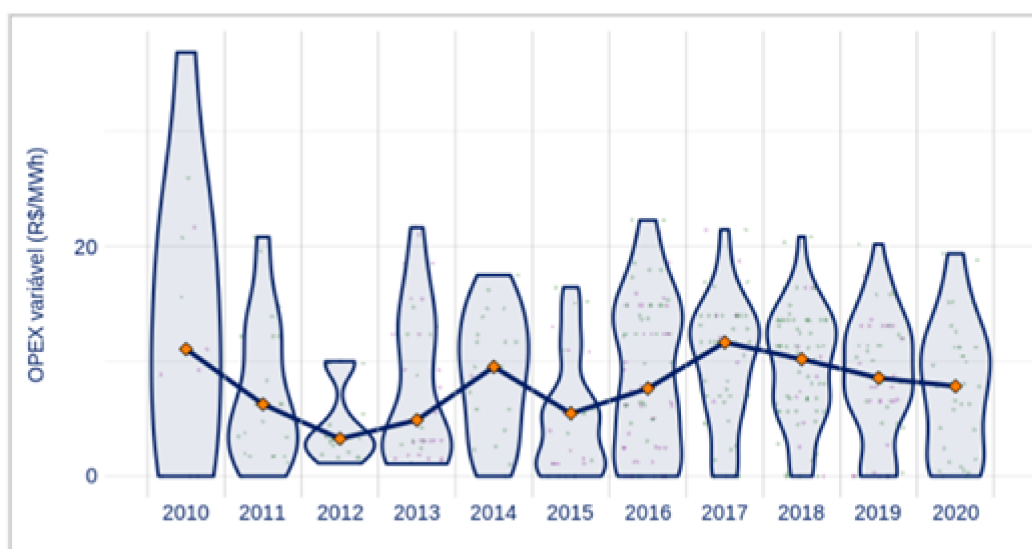


Figura 19 – Evolução dos valores de O&M variável, em R\$/MWh.ano de projetos de PCH e CGH

Fonte: EPE (2023)

típicos variam de 1% a 4%. O custo médio de O&M de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH) varia entre 1% e 5% dos custos de investimento (*European Small Hydro-power Association* (ESHA), 2013). Outro estudo apresentado pela *International Energy Agency* (IEA) (2010), aponta que o custo gira em torno de 2,2% para grandes centrais hidrelétricas e de 2,2% a 3% para projetos menores, com uma média global de cerca de 2,5%.

O World Bank (2020), escreveu um manual que busca aumentar a conscientização entre gerentes de concessionárias, tomadores de decisão e outros interessados sobre os benefícios do desenvolvimento de estratégias sólidas de O&M para todas as usinas hidrelétricas

existentes e aquelas em desenvolvimento. Os autores Kumar e Saini (2022), listaram em seu trabalho uma revisão abrangente da literatura sobre os aspectos de operação e manutenção de usinas hidrelétricas. Tiago Filho, Santos e Barros (2017) apresentaram o Fator de Aspecto, do inglês, *Aspect Factor* (AF), que é um parâmetro baseado no método dos mínimos quadrados que representa as características físicas de um esquema de usina para determinar o custo unitário de projetos de PCH no Brasil e na Índia.

O alto custo de O&M em uma PCH pode refletir negativamente no lucro final do empreendimento. Nesse sentido é importante entender qual a relação entre custo de O&M com as sazonalidades dos recursos hídricos. De acordo com Tiago Filho et al. (2011) e Tiago Filho, Santos e Barros (2017) o custo unitário (C_{un}) de uma PCH pode de ser expressa em função do AF, dado pela Equação (25).

$$C_{un} = k \cdot (AF)^n \quad (25)$$

Onde,

k e n são constantes empíricas que variam de acordo com as características regionais do mercado;

C_{un} é o custo unitário.

O AF é definido pela Equação (26). Conforme explicado por Tiago Filho, Santos e Barros (2017), essa relação pode ser representada matematicamente, dependendo dos valores em pares ordenados de altura de queda d'água (H) e potência (P) do empreendimento. Esses elementos estão estreitamente associados à configuração física da usina e, influenciam os custos de construção civil e a seleção dos dispositivos eletromecânicos. Portanto, o AF, em (rps^{-1}), pode ser vinculado aos custos globais dos empreendimentos de usinas hidrelétricas.

$$AF = 1821,43 \frac{P^{0,5}}{H^{1,25}} \quad (26)$$

Onde,

P é a potência do empreendimento em MW;

H é a altura de queda líquida em metros (m).

O custo de O&M gira em torno de 2% a 3% do custo unitário do empreendimento (KUMAR; SAINI, 2022). Para este estudo foi utilizada a média desse intervalo, ou seja, 2,5% do C_{un} para a estimativa do cálculo de custo de O&M. Substituindo as Equações (25) e (26) na Equação (27), obtém-se o custo de Operação e Manutenção ($C_{O\&M}$) que pode ser calculado a partir da Equação (28).

$$C_{O\&M} = 0,025 \cdot C_{un} \quad (27)$$

$$C_{O\&M} = 0,025 \cdot k \left(1821,43 \frac{P^{0,5}}{H^{1,25}} \right)^n \quad (28)$$

Onde,

$C_{O\&M}$ [$\$/kW$] é o custo de Operação e Manutenção por unidade de potência instalada;
 C_{un} é o custo unitário.

Ao lidar com um pequeno projeto de hidrelétrica, é importante avaliar sua viabilidade financeira juntamente com a viabilidade técnica antes de tomar qualquer decisão de investimento (TSUANYO et al., 2023). Singal e Saini (2007) fizeram uma análise do custo de esquemas de pequenas hidrelétricas baseados em canais nas planícies e outras regiões do país em que a água é usada também para outros fins, como irrigação/bebida através de canais, pequenas barragens etc. Tsuanyo et al. (2023) revisaram e identificaram os principais parâmetros técnicos e econômicos necessários para o projeto ótimo do projeto de fluxo livre, com base em uma literatura relevante e na experiência em campo, e propôs uma classificação dos modelos revisados para serem possivelmente usados como referência por estudiosos e profissionais no campo. O trabalho de Selak et al. (2015) se concentra na O&M de PCHs e avalia a viabilidade de diferentes níveis de automação da O&M.

4.2 Perdas de Carga no sistema hidráulico da PCH

Uma variável importante a ser analisada na eficiência da geração de energia, é a redução das perdas de cargas. A considerável capacidade de geração hidrelétrica no Brasil sugere que mesmo pequenas perdas percentuais no sistema podem representar valores significativos. As perdas de carga podem significar uma parcela considerável da disponibilidade da queda livre existente na instalação, podendo variar até de 2% para instalações de pequenas quedas (LEITE, 2020). A estimativa de perda de carga em condutos pressurizados é um problema notável em estudos de otimização, análise hidráulica de dutos e sistemas de distribuição de água (BARDESTANI et al., 2017). A perda de carga a ser assumida para o projeto do túnel é uma questão econômica, devendo ser compreendida como uma quantidade renunciada de energia (ELETROBRAS, 2023). É importante conhecer o circuito hidráulico que compõe o empreendimento para detectar os pontos de perdas de carga.

Em uma PCH, a perda de carga é uma variável de atenção pois está relacionada à eficiência na geração de energia elétrica. Quanto menor as perdas de carga maior será a geração de energia. Por isso é de suma importância garantir que o sistema atue com a menor perda de carga possível e identificar oportunidade de otimizar a geração de energia.

Geralmente as perdas hidráulicas estão relacionadas à adução, canais, túneis, grades e as perdas na tubulação forçada (entrada, curvas, reduções e bifurcações) e outros elementos que compõem o circuito hidráulico do empreendimento. Devido à complexidade de avaliar a perda de carga em cada um desses pontos especificados, dadas as inúmeras combinações de design de PCH, as perdas de carga são geralmente estimadas de forma empírica, em função da vazão do rio. As perdas de carga ou perdas hidráulica h_{Perdas}

podem ser obtidas utilizando a Equação (29).

$$h_{Perdas} = w \times Q_t^2 \quad (29)$$

Onde,

w é a constante de perdas de carga.

A constante w é fornecida pelo fabricante com base nas características específicas do tipo de turbina. Nos casos em que a turbina possui dados experimentais de ensaio sobre perdas de carga, é possível determinar, de forma empírica, o valor da constante w . Para isso, pode-se utilizar a técnica de ajuste pelo método dos mínimos quadrados, descrita na seção 4.1.1.1, que permite ajustar os dados experimentais à equação teórica, minimizando o erro entre os valores observados e os estimados. Dessa forma, a abordagem proposta não apenas garante maior precisão na determinação de w , mas também viabiliza uma análise mais objetiva do desempenho dos componentes do circuito hidráulico, como turbina, canal de adução, grades, entre outros, considerando diferentes condições operacionais do empreendimento.

Muitos autores estudaram as perdas de carga em sistemas hidrelétricos. Jardim et al. (2022) ajustaram modelos matemáticos explícitos para determinar o fator de atrito (f) determinante nas perdas de carga. Bastos et al. (2021) apresentaram um estudo de caso, onde estimou-se a perda de geração devido ao aumento da rugosidade do circuito hidráulico da Pequena Central Hidrelétrica REPI – PCH REPI, no município de Wenceslau Brasil, Minas Gerais. Milukow et al. (2019) fizeram uma estimativa do fator de atrito de *Darcy-Weisbach* para riachos não calibrados usando Programação de Expressão Gênica e Máquinas de Aprendizagem Extrema. Pimenta et al. (2018) analisou as aproximações explícitas de fator de carga f para condutos pressurizados em comparação com a formulação de *Colebrook – White*. Moody (1944) estimou, de maneira simples, os fatores de atrito a serem utilizados no cálculo da perda de carga em tubulações, condutos fechados cheios e com fluxo constante. Leite (2020) fez uma análise do impacto do aumento da perda de carga em instalações hidrelétricas de pequeno porte, em especial das Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH), equipadas com condutos de baixa e alta pressão, decorrente da influência do aumento da rugosidade interna dos condutos de adução e o impacto na redução da energia firme nessas instalações.

4.3 Modelo de Otimização Multiobjetivo para Pequenas Centrais Hidrelétricas em cascata

Funções Objetivo

- Maximizar o Potencial de Energia Total das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) em Cascata

Em sistemas de geração de energia com múltiplas PCHs operando em cascata, a potência total gerada pelo conjunto de usinas é representada pela Equação (30). Essa equação reflete a contribuição de cada usina, desde a primeira ($i = 1$) até a enésima ($i = n$), para a energia total gerada no sistema, sendo n o número total de PCHs em cascata.

$$E_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n \eta_{t,i} \eta_{g,i} \rho g Q_{t,i} H_{t,i} \quad (30)$$

Onde,

$\eta_{t,i}$ é o rendimento da turbina para a PCH i ;

$\eta_{g,i}$ é o rendimento do gerador para a PCH i ;

ρ é a massa específica da água (kg/m^3);

g é a aceleração da gravidade (m/s^2).

$Q_{t,i}$ é a vazão turbinada para a PCH i ,

$H_{t,i}$ é a altura de queda para a usina PCH i ,

□ Minimizar o custo de Operação e Manutenção (O&M) Total da Cascata

Em sistemas de geração de energia com múltiplas PCHs em cascata, a otimização dos custos de operação e manutenção (O&M) desempenha um papel fundamental para garantir a viabilidade econômica e a eficiência do sistema. A Equação (31) apresenta o custo total de O&M por unidade de potência instalada considera o custo individuais de cada PCH ao longo da cascata.

$$C_{\text{O\&M_total}} \left[\frac{\$}{\text{kW}} \right] = \sum_{i=1}^n 0,025 \cdot k \left(\frac{1821,43 P_i^{0,5}}{H_{t,i}^{1,25}} \right)^m \quad (31)$$

$C_{\text{O\&M_total}} \left[\frac{\$}{\text{kW}} \right]$ é o custo total de operação e manutenção para todas as usinas em cascata;

P_i é a potência da PCH i ;

$H_{t,i}$ é a altura de queda da PCH i ;

k e m são parâmetros específicos da fórmula que dependem das características da PCH i .

□ Minimizar as perdas de Carga do sistema hidráulico

Em sistemas de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) organizadas em cascata, as perdas de carga acumuladas ao longo das usinas têm um impacto significativo no desempenho hidráulico e na eficiência energética do conjunto. A Equação (32) pode ser adaptada para representar a soma das perdas hidráulicas individuais de cada usina. Essa abordagem considera fatores como a vazão turbinada (Q_t), e características específicas do projeto, oferecendo uma visão integrada das perdas ao longo da cascata.

$$h_{Perdas} = \sum_{i=1}^n (w_i \times Q_{t,i}^2) \quad (32)$$

h_{Perdas} é a perda de carga total acumulada ao longo de todas as PCHs no sistema (em metros).

w_i é a constante de perda de carga para a i -ésima PCH, definida pelo fabricante da turbina ou pelas condições hidráulicas específicas da PCH (s^2/m^5).

$Q_{t,i}$ é a vazão turbinada pela i -ésima PCH (m^3/s).

Condições de restrição

O modelo de operação ótima multiobjetivo está sujeito a diversas restrições que impactam diretamente na viabilidade e eficiência da operação do sistema, sendo uma delas a restrição relacionada à altura de turbinamento. A altura de turbinamento é um dos parâmetros cruciais para determinar a quantidade de energia gerada por uma usina hidrelétrica.

□ Restrição altura de turbinamento

A Altura máxima da queda bruta de projeto H_b é a diferença entre a cota máxima normal a montante e a cota normal a jusante (m). A altura líquida disponível para a geração de energia é afetada por perdas hidráulicas e por limites operacionais ($H_{oper}^{\min}, H_{oper}^{\max}$) impostos por fatores técnicos e de segurança.

Limite mínimo operacional (H_{oper}^{\min}): Quando a altura está abaixo do limite mínimo operacional, não há altura líquida disponível, impossibilitando a geração de energia:

$$\text{Se } H < H_{oper}^{\min}, \text{ então } H_t = 0 \quad (33)$$

Intervalo de operação normal ($H_{oper}^{\min} \leq H \leq H_{oper}^{\max}$): Dentro desse intervalo, a altura líquida é calculada subtraindo-se as perdas hidráulicas (h_{Perdas}) da altura medida H . Essas perdas representam a diminuição de energia devido a fatores como fricção e turbulência nas turbinas, e são uma parte importante do processo de cálculo da geração de energia.

$$H_{oper}^{\min} \leq H \leq H_{oper}^{\max} \text{ então } H_t = H - h_{Perdas} \quad (34)$$

Limite máximo operacional (H_{oper}^{\max}): Caso a altura medida H ultrapasse o limite máximo operacional, a altura líquida é limitada ao valor máximo operacional, descontando também as perdas hidráulica. Isso ocorre para garantir que a operação não ultrapasse os parâmetros seguros para a estrutura da barragem e para as turbinas, evitando danos ou ineficiências operacionais.

$$\text{Se } H > H_{oper}^{\max}, \text{ então } H_t = H_{oper}^{\max} - h_{Perdas} \quad (35)$$

Variáveis envolvidas: H é a altura medida da série histórica (em metros), que varia ao longo do tempo, dependendo do nível da água no reservatório.

h_{Perdas} são as perdas hidráulicas associadas ao sistema, que podem incluir perdas devido ao atrito nos condutos forçadas, na turbina, e outros componentes do sistema. Essas perdas são um valor fixo ou calculado com base em características específicas da planta hidrelétrica.

□ Restrição da vazão de turbinamento

A vazão afluente (Q_{af}) é a vazão, em m^3/s , que chega à PCH. Ela pode ser definida como a diferença entre vazão natural (Q_n) medida pelas estações fluviométrica (m^3/s) e a vazão remanescente (q_r) que inclui também a vazão para uso consultivos (como abastecimento humano, irrigação, entre outros). Essa relação assegura que a PCH opere dentro de suas limitações técnicas, ao mesmo tempo em que gerencia o fluxo de água excedente e as obrigações ambientais e sociais associadas ao uso do recurso hídrico. De acordo com a Equação (36).

$$Q_{af} = Q_n - q_r \quad (36)$$

A vazão turbinada (Q_t) é restrita pela vazão afluente (Q_{af}) disponível no momento, pelas condições de operação mínima e pela capacidade máxima da turbina.

Limite de vazão mínima operacional (Q_{turb}^{\min}): Quando a vazão afluente é inferior ao limite mínimo de operação da turbina, a água é totalmente direcionada como vazão vertida (q_v), e a turbina não opera.

$$\text{Se } Q_{af} < Q_{turb}^{\min}, \text{ então } q_v = Q_{af} \text{ e } Q_t = 0 \quad (37)$$

Intervalo de vazão de operacional ($Q_{turb}^{\min} \leq Q_{af} < Q_{turb}^{\max}$): Quando a vazão afluente está no intervalo operacional da turbina, apenas a vazão Remanescente e usos consultivos são vertidas.

$$Q_{turb}^{\min} \leq Q_{af} < Q_{turb}^{\max}, \text{ então} \quad (38)$$

$$q_v = \text{vazão remanescente e usos consultivos e } Q_t = Q_{af} - q_v$$

Limite de vazão máxima operacional (Q_{turb}^{\max}): Quando a vazão afluente Q_{af} que chega na PCH é maior ou igual à vazão máxima (Q_{turb}^{\max}) que a turbina pode turbinar, ocorre um excedente de água (q_v), que é a diferença entre a vazão afluente total (Q_{af}) e a vazão efetivamente turbinada (Q_t). Esse excedente de água, q_v , é liberado pela PCH sem ser utilizado para a geração de energia elétrica. O valor de Q_t , por sua vez, é limitado pela capacidade máxima da turbina (Q_{turb}^{\max}).

$$Q_{af} \geq Q_{turb}^{\max}, \text{ então } q_v = Q_{af} - Q_t \quad (39)$$

Variáveis envolvidas:

$Q_{\text{turb}}^{\text{max}}$ é a vazão máxima turbinada (m^3/s);

Q_t é a vazão que passa através da turbina (m^3/s);

q_r é a vazão remanescentes + vazão para usos consultivo (m^3/s);

q_v é a vazão liberada pela PCH que não é utilizada para geração de energia elétrica.

□ Restrição de eficiência da turbina

A eficiência da turbina (η_t) é um fator que depende do tipo de turbina, da vazão operada e da altura líquida. A eficiência é tipicamente expressa como uma curva em função da vazão turbinada (Q_t) e é restrita por um intervalo operacional.

$$\eta_t(Q_t, H_t) = f(Q_t, H_t) \quad (40)$$

Para este estudo, considera-se que a eficiência da turbina deve ser limitada a um valor mínimo de 0,6. Valores de eficiência inferiores a esse limite podem comprometer a integridade estrutural e mecânica da turbina, resultando em problemas como cavitação, vibrações excessivas, desgastes acelerados e outros danos que comprometem tanto o desempenho quanto a durabilidade do equipamento. Assim, essa restrição busca garantir que a turbina opere dentro de condições seguras, maximizando sua vida útil e eficiência energética.

□ Restrição de eficiência do gerador

A eficiência do gerador (η_g) depende da potência mecânica fornecida pela turbina e das condições elétricas de operação. Esta eficiência varia com a carga e pode ser expressa como uma função da potência de entrada (P_{in}):

$$\eta_g = g(P_{\text{in}}) \quad (41)$$

Quando a potência de entrada (P_{in}) estiver abaixo da capacidade mínima do gerador (P_{min}), o gerador não é capaz de operar. Nesse caso, a eficiência do gerador será zero.

$$P_{\text{in}} < P_{\text{min}}, \quad \text{então} \quad \eta_g = 0 \quad (42)$$

Quando a Potência de entrada do gerador (P_{in}) está dentro do intervalo entre a capacidade mínimo e a capacidade máxima, a eficiência do gerador será proporcional à potência de entrada, atingindo um valor máximo de eficiência quando o gerador operar em sua capacidade máxima.

$$P_{\text{min}} \leq P_{\text{in}} \leq P_{\text{max}}, \quad \text{então} \quad \eta_g = \eta_{g,\text{max}}(P_{\text{in}}) \quad (43)$$

Se a potência de entrada ultrapassar a capacidade máxima (P_{max}) do gerador, o gerador será desligado para evitar sobrecarga, resultando em uma eficiência de zero:

$$P_{\text{in}} > P_{\text{max}}, \quad \text{então} \quad \eta_g = 0 \quad (44)$$

Variáveis envolvidas

η_g é a eficiência do gerador (%);

P_{in} é a potência mecânica fornecida pelo eixo da turbina (kW).

$g(P_{\text{in}})$ é uma função empírica baseada nos dados de desempenho do gerador.

P_{min} , P_{max} são as potências mínima e máxima operacional do gerador (kW), respectivamente.

□ Restrição de Potência ativa do empreendimento

A potência ativa total gerada (P_{ativa}) por um sistema de PCHs em cascata é restrita pelas eficiências combinadas da turbina e do gerador, pela vazão turbinada ($Q_{t,i}$) e pela altura líquida ($H_{t,i}$):

$$P_{\text{ativa}} = \sum_{i=1}^n \eta_{t,i} \eta_{g,i} \rho_g Q_{t,i} H_{t,i} \quad (45)$$

Não há geração de potência ativa se a vazão turbinada ou a altura líquida forem nulas.

$$\text{Se } Q_{t,i} \text{ ou } H_{t,i} = 0, \quad P_{\text{ativa}} = 0 \quad (46)$$

A potência ativa é limitada pela melhor combinação de vazão e altura operacional.

Estudo de Caso: Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) em cascata - Rio Sapucaí/SP

Este capítulo apresenta a otimização multiobjetivo utilizando o algoritmo evolucionário NSGA II, aplicado à operação ótima de PCHs em cascata do Rio Sapucaí/SP. Foram consideradas três funções objetivo: a maximização do potencial de energia elétrica; a minimização do custo de Operação & Manutenção (O&M); e a minimização das perdas de carga. O problema está sujeito as seguintes restrições: de caráter operacionais, como os limites de vazão turbinada (m^3/s) e de altura (m) de queda d'água para operação); Restrições físicas dos equipamentos eletromecânicos, como a eficiência da turbina e do gerador; E restrição de potência ativa (P) gerada no empreendimento (MW). A aplicação dessa metodologia possibilita que os empreendimentos hidroelétricos estudados possam garantir uma melhor eficiência na geração conjunta de energia elétrica, com menos recursos e perdas possível.

O fluxograma da Figura 20 ilustra o procedimento adotado para a obtenção da constante de carga, com base nos dados de vazão e perdas de carga provenientes de ensaios, comissionamento ou simulações realizadas para cada PCH.

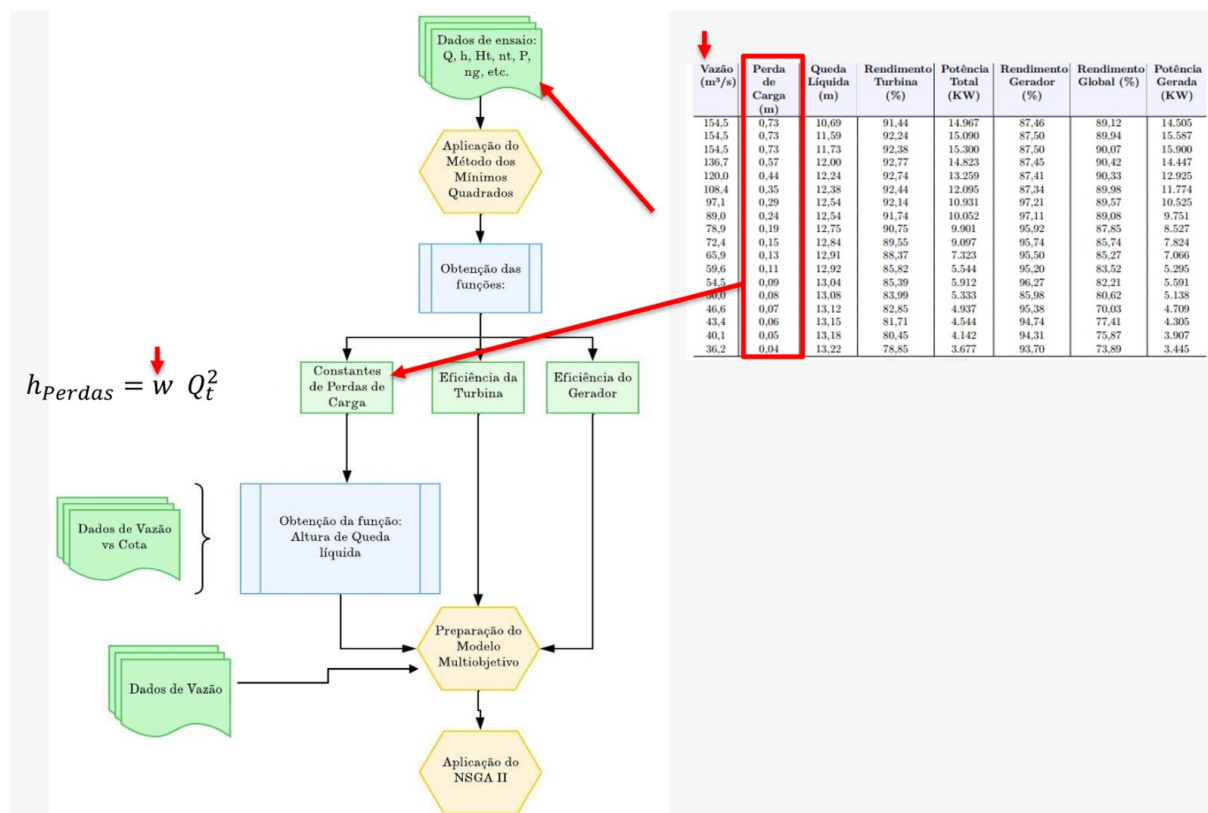


Figura 20 – Fluxograma da Metodologia - obtenção da constante de perda de carga
 Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O fluxograma da Figura 21 ilustra o procedimento adotado para obtenção dos coeficientes da função de eficiência da turbina, a partir dos dados de vazão, queda líquida e do rendimento da turbina obtidos nos ensaios, comissionamento ou simulações realizadas para cada PCH.

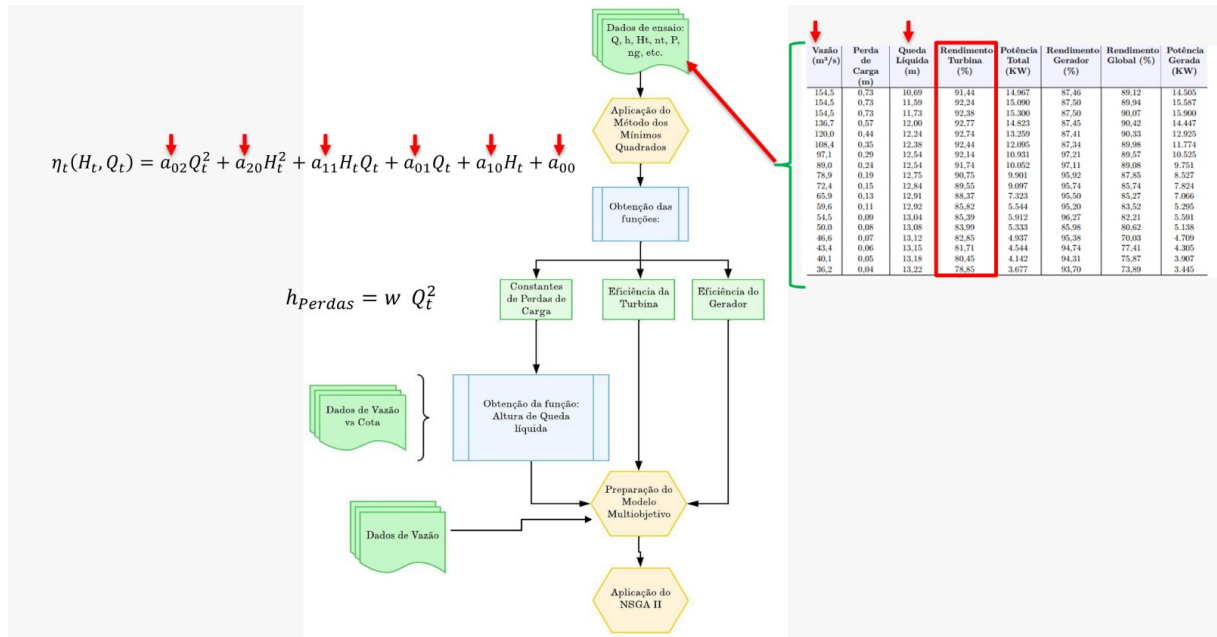


Figura 21 – Fluxograma da Metodologia - obtenção dos coeficientes da função multivariada de eficiência de cada turbina

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O fluxograma da Figura 22 ilustra o procedimento adotado para obtenção dos coeficientes da função de eficiência do gerador, a partir dos dados rendimento do gerador e de potência gerada do empreendimento, obtidos nos ensaios, comissionamento ou simulações realizadas para cada PCH.

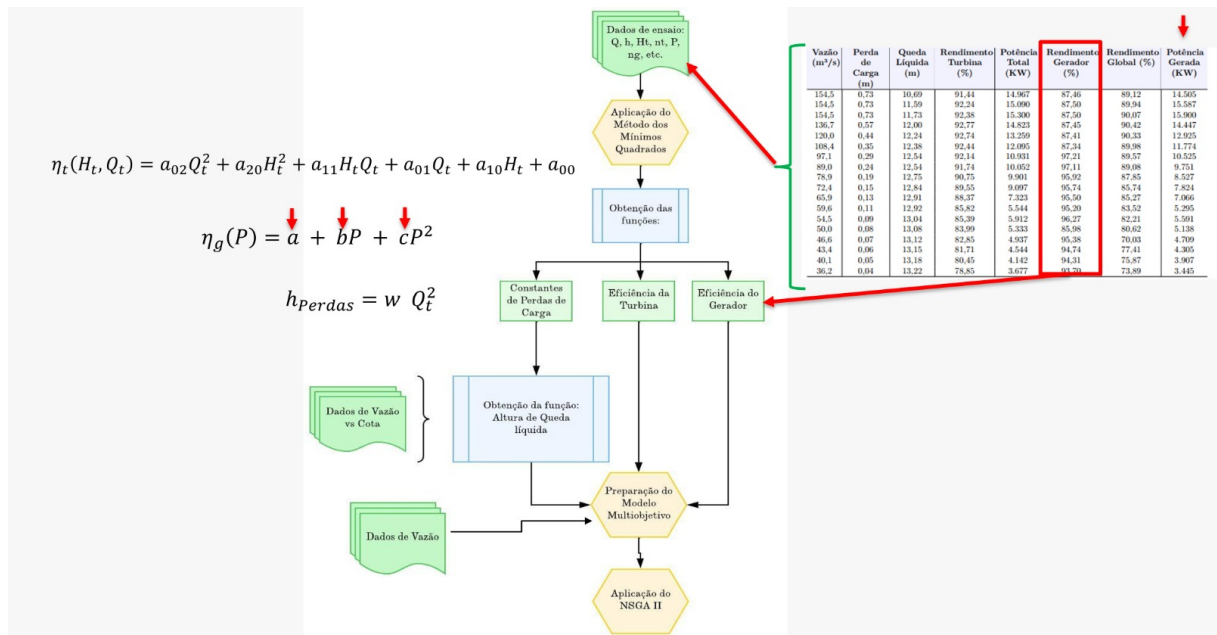


Figura 22 – Fluxograma da Metodologia - obtenção dos coeficientes da função de eficiência de cada gerador

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O fluxograma da Figura 23 ilustra o procedimento adotado para a atualização dos

dados de vazão na etapa de preparação do modelo multiobjetivo. Os dados de vazão considerados para as PCHs foram obtidos a partir da base de dados do HidroWeb.

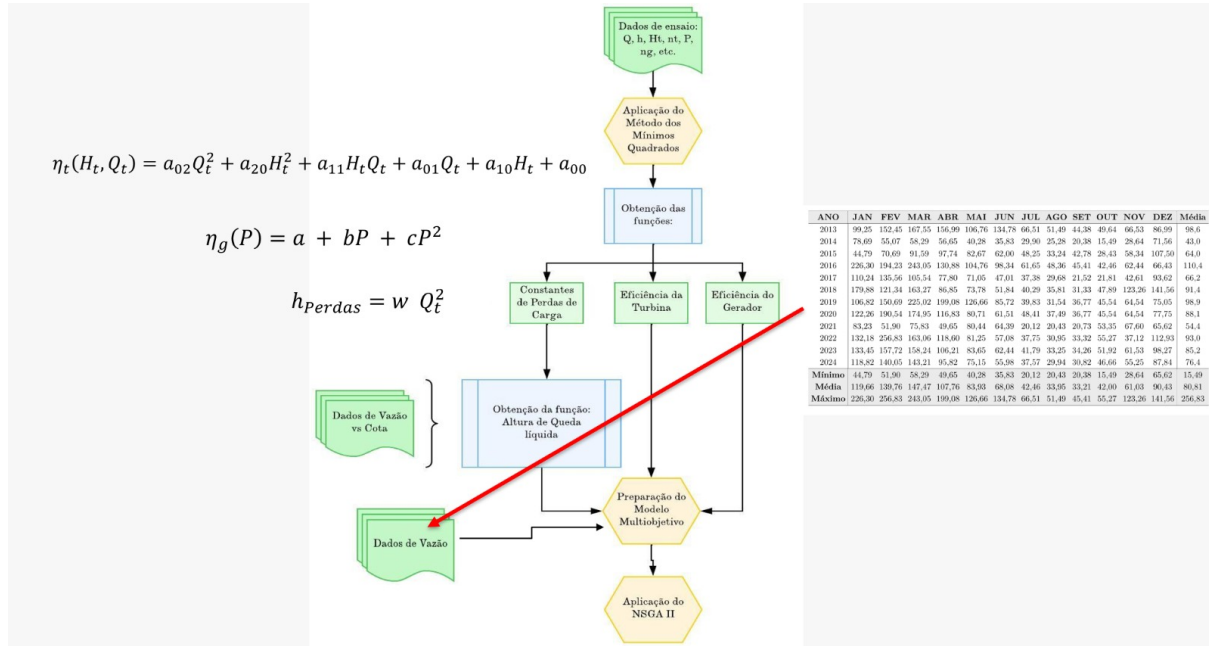


Figura 23 – Fluxograma da Metodologia - dados de vazão

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Nessa etapa da metodologia, os dados de vazão e cota do canal de descarga foram considerados para a obtenção da função de altura disponível. Em seguida, essa função foi adaptada para gerar os dados de altura líquida a serem incorporados no modelo multiobjetivo. Por fim, após a aplicação do algoritmo NSGA-II, foram obtidos os resultados da otimização.

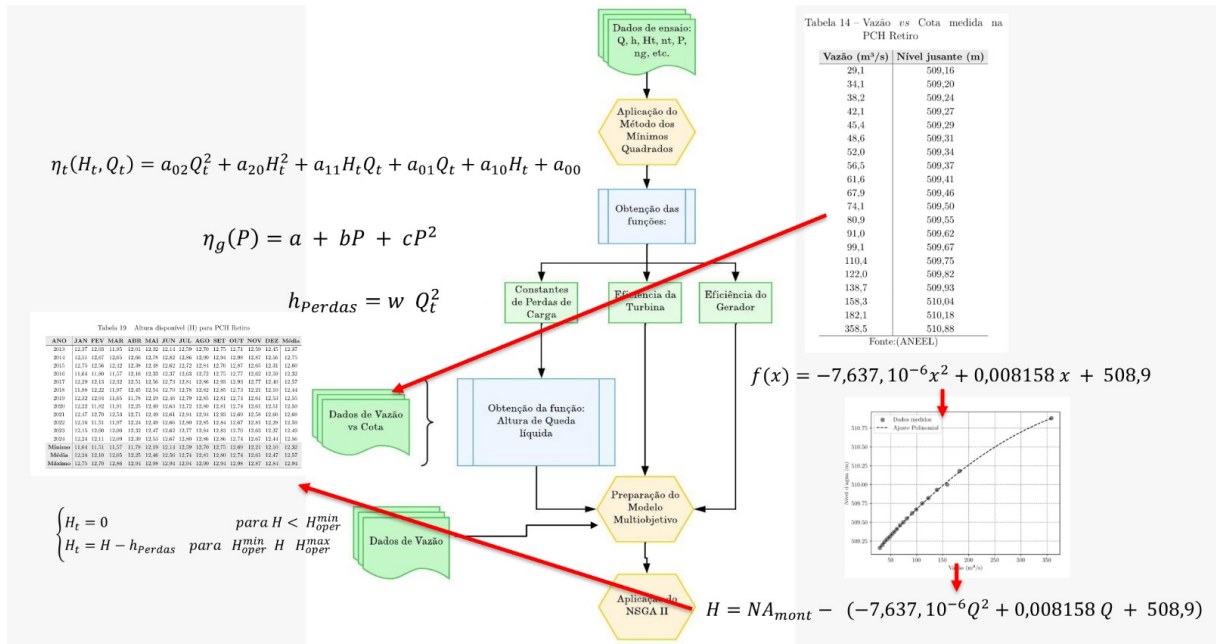


Figura 24 – Fluxograma da Metodologia - obtenção das séries de altura líquida de queda d'água de cada PCH

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

5.1 Objeto de Estudo

O objeto de estudo abrange os aproveitamentos hidrelétricos em cascata no Rio Sapucaí Paulista, um afluente do Rio Grande, localizado no nordeste do Estado de São Paulo, Brasil. Entre esses empreendimentos, destacam-se as PCHs Dourados, São Joaquim, Palmeiras e Retiro.

A PCH Dourados está situada na margem esquerda do Rio Sapucaí Paulista, pertencente à bacia do Rio Grande, no município de Nuporanga-SP. Ela fica aproximadamente 70 km distante de Ribeirão Preto e cerca de 370 km da capital paulista, São Paulo, sendo acessada principalmente pela estrada vicinal que conecta Nuporanga à cidade de São José da Bela Vista. Ela é operada pela Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), com autorização de concessão da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) sob o número 48100.000311/1997-28. A PCH Dourados está cadastrada sob o Código Único de Empreendimentos de Geração – CEG PCHPHSP026844-5. A vazão do Rio Sapucaí Paulista é desviada e conduzida por meio de um canal de adução de aproximadamente 3,5 Km, sendo um trecho dele, elevado atravessando o próprio rio (Canal elevado). A PCH Dourados, Figura 25, está equipada com uma turbina do tipo Francis de eixo vertical, projetada para operar a uma altitude de aproximadamente 589,54 metros. Esta turbina aproveita uma queda bruta nominal de 29,20 metros e uma queda líquida de 28,50 metros, convertendo a energia hidráulica em energia mecânica com eficiência. Com uma potência nominal de aproximadamente 11 MW e operando a uma rotação de 200 rpm, a turbina

é adequada para médias alturas de queda e vazões, características comuns em instalações hidrelétricas de médio porte. A configuração de eixo vertical facilita a conexão direta com o gerador síncrono, otimizando o desempenho do conjunto turbina-gerador. O gerador da PCH Dourados é um modelo *SLW2500* fabricado pela *WEG Indústrias S/A*. Este gerador síncrono possui uma potência nominal de 12.000 kVA e opera a uma tensão nominal de 6.900 V , com corrente nominal de 1.004 A . Sua rotação é de 200 rpm , adequada para a frequência de 60 Hz , com um fator de potência de $0,9$. O sistema de excitação funciona a uma tensão de 480 V e corrente de 151 A .



Figura 25 – PCH Dourados
Fonte: Fotografia do autor (2025)

A PCH São Joaquim está localizada no município de Guará em São Paulo e está cadastrada sob o Código Único de Empreendimentos de Geração – CEG PCHPHSP026844-5 e também é operada pela CPFL. A PCH São Joaquim, Figura 26, está equipada com três unidades geradoras, cada uma composta por uma turbina tubular tipo "S" com rotor *Kaplan* e gerador a montante, também conhecidas como "CAT" (*Compact Axial Turbine*). Fabricadas pela *ENERG POWER/VA TECH Escher Wyss*, essas turbinas possuem eixo horizontal e são diretamente acopladas a geradores síncronos. Cada unidade tem uma potência nominal de $2,78\text{ MW}$, totalizando $8,34\text{ MW}$ de potência para a usina. As turbinas operam com uma vazão nominal unitária de $18,33\text{ m}^3/\text{s}$ e aproveitam uma queda nominal de $17,05$ metros. A rotação nominal é de 360 rpm , com sobrevelocidade de 576

rpm, e a elevação da linha de centro do rotor da turbina está na cota de 552,00 metros. As turbinas *tipo S* com rotor *Kaplan* são especialmente adequadas para locais com baixas quedas e grandes vazões, oferecendo alta eficiência em uma ampla faixa de operação. A configuração com gerador a montante e eixo horizontal facilita a manutenção e reduz o espaço necessário para a instalação, tornando-as ideais para PCHs com restrições de espaço.



Figura 26 – PCH São Joaquim
Fonte: Fotografia do autor (2025)

A PCH Palmeiras está localizada entre os municípios de São Joaquim da Barra e Guará em São Paulo. Administradas, atualmente, pela *China Three Gorges Brasil Energia S.A.* (CTG Brasil). Os detalhes do empreendimento constam nos Processos 48500.003536/2001-72. Está cadastrada sob o Código Único de Empreendimentos de Geração – CEG PCH.PH.SP.028800-4.01. A PCH Palmeiras, Figura 27, tem potência instalada de 16,5 MW, área de inundação de aproximadamente 2,60 km². O seu nível máximo de enchimento é limitado a cota , aproximadamente, 556 m. O empreendimento

possui uma unidade geradora, ou seja, uma turbina do tipo bulbo poço, caracterizada por seu eixo horizontal e estrutura compacta em monobloco, incorporando um munhão integrado. A turbina possui quatro pás que são ajustadas por meio de um sistema de regulação acionado por óleo hidráulico pressurizado, garantindo precisão e eficiência no controle de sua operação. Este equipamento foi projetado para operar com uma potência nominal de 16,856 MW, utilizando uma altura líquida nominal de 12,09 metros, demonstrando sua capacidade de conversão eficiente da energia hidráulica em energia mecânica. O aproveitamento em questão possui outorga de uso do recurso hídrico, concedida pela ANEEL por meio da Resolução nº 706, de 17 de dezembro de 2002b, em consonância aos preceitos legais então vigentes.



Figura 27 – PCH Palmeiras.
Fonte: CTG Brasil (2025a)

A PCH Retiro, está localizada entre os municípios de São Joaquim da Barra e Guará.

A *China Three Gorges Brasil Energia S.A.* (CTG Brasil) também tem concessão de operação desse empreendimento. Muitas informações sobre o empreendimento estão disponíveis no processo público junto à ANEEL, registrado sob o número 48500.003534/2001-47. E cadastrada sob o Código Único de Empreendimentos de Geração – CEG PCH.PH.SP.028738-5.01. A PCH Retiro, Figura 28, tem potência instalada de 16 MW. O empreendimento possui área de inundação de aproximadamente $2,96 \text{ km}^2$, ocupando um volume de água de, aproximadamente, $17,87 \text{ hm}^3$. Seu nível máximo de enchimento é está na cota de aproximadamente 522,5 m. É a última PCH do Rio Sapucaí. A PCH possui uma turbina hidráulica do tipo Bulbo Poço de eixo horizontal e rotação de 600 rpm, com potência, de aproximadamente, 16,236 MW. Acoplada à turbina, através de multiplicador de velocidade, a unidade possui um gerador síncrono trifásico, de eixo horizontal, com potência de 17,590 MVA, tensão nominal de 6900 V, fator de potência nominal de 0,9, frequência nominal de 60 Hz, rotação nominal de 600 rpm, para operação contínua. A PCH Retiro, originalmente autorizada a estabelecer-se como Produtor Independente de Energia Elétrica por meio da Resolução nº 549, de 8 de outubro de 2002a.



Figura 28 – PCH Retiro.
Fonte: CTG Brasil (2025b)

A Figura 29 mostra todas as PCHs existentes no Rio Sapucaí Paulista. As PCHs em cascata de Dourados, São Joaquim, Palmeiras e Retiro foram utilizadas para validar o modelo. Foram realizadas visitas técnicas *in loco* nas PCHs estudadas para compreender o funcionamento da geração de energia elétrica, a estrutura física e seus componentes eletromecânicos. O problema pode ser estendido para otimizar a Potência na Geração de energia de todas as PCHs em cascata do Rio Sapucaí/SP. No entanto, não foi possível testar com todas as PCHs devido à falta de dados de ensaio das turbinas do empreendimento Anhanguera. Alguns dados geralmente são restritos às empresas que administram os empreendimentos. Os dados das PCHs utilizados para estudo, em sua maioria, foram obtidos através da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), outros disponibilizados pela CPFL e CTG Brasil.

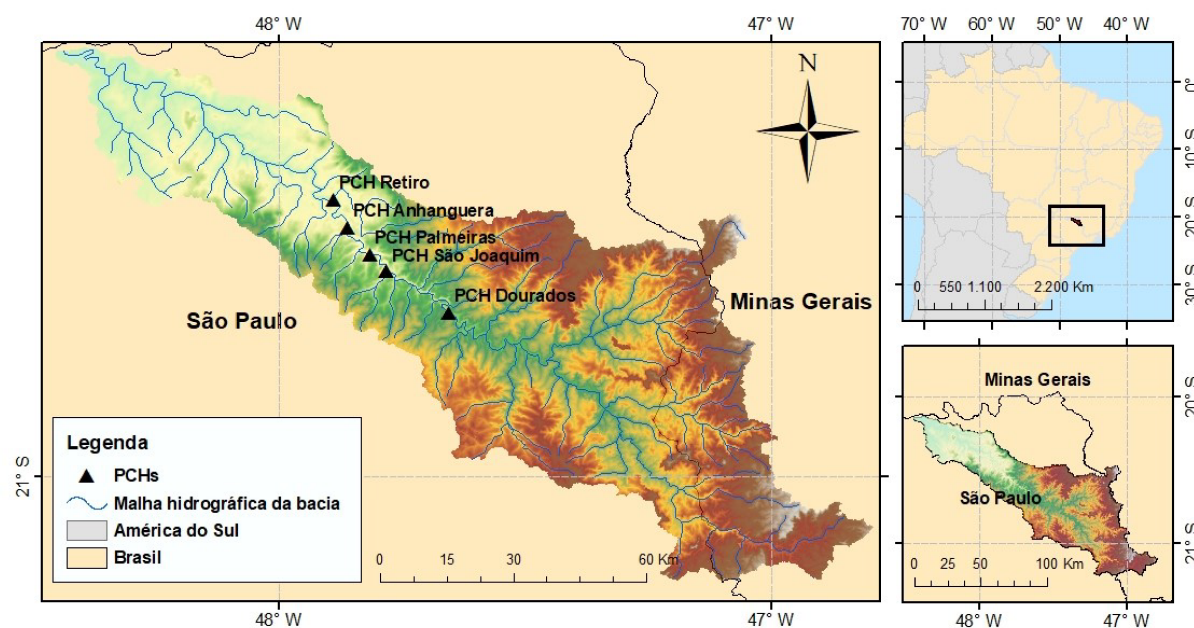


Figura 29 – Região de estudo - Bacia Hidrográfica das PCH's em cascata do Rio Sapucaí
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 30 mostra o Diagrama Esquemático das PCHs em cascata e sua respectiva potência instalada. O Rio Sapucaí deságua na represa da UHE Porto Colômbia (Divisa do Estado de Minas Gerais e São Paulo) no Rio Grande.



Figura 30 – Diagrama Esquemática das PCHs do Rio Sapucaí
Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em ONS (2019)

Os dados apresentados na Tabela 3 resumem, de forma clara e organizada, as principais variáveis utilizadas nos estudos energéticos das PCHs do Rio Sapucaí. Essas informações fornecem uma visão geral dos parâmetros técnicos e operacionais de cada PCH.

Tabela 3 – Variáveis utilizadas nos estudos energéticos

| Variável | Dourados | São Joaquim | Palmeiras | Retiro |
|---|----------------------------|-------------|---------------|---------------|
| Número de Turbinas | 1 | 3 | 1 | 1 |
| Tipo de Turbina | Francis (eixo vertical) | Kaplan S | Bulbo Poço | Bulbo Poço |
| Potência Unidade (MW) | 11,00 | 2,78 | 16,856 | 16,236 |
| Potência Instalada (MW) | 10,80 | 8,05 | 16,50 | 16,00 |
| Geração Média de Energia (MWh) | — | — | 8,54 | 8,36 |
| N.A. máximo normal de montante (m) | 618,7 | 573,5 | 566,0 | 522,5 |
| N.A. normal a jusante (m) | 589,5 | 556,0 | 542,9 | 510,0 |
| Queda bruta (m) | 29,20 | 17,05 | 13,10 | 12,50 |
| Perdas hidráulicas (m) | 0,70 | 0,45 | 0,26 | 0,25 |
| Rendimento do Conjunto Turbina-Gerador (%) | 82,4 | 82,8 | 90,2 | 90,2 |
| Indisponibilidade Forçada (%) | 1,644 | 1,644 | 2,000 | 2,000 |
| Indisponibilidade Programada (%) | 1,826 | 1,826 | 2,000 | 2,000 |
| Vazão Máxima Turbinada (m ³ /s) | 44,00 | 18,33 | 154,50 | 154,50 |
| Vazão Remanescente e Usos Consultivos (m ³ /s) | 11,73 | 13,80 | 1,80 | 1,80 |
| Área do Reservatório no N.A. máximo normal (km ²) | — | — | 2,600 | 2,960 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em dados da ANEEL (2025a)

5.2 Definição das funções de Eficiência das turbinas das PCHs

A eficiência da turbina é fornecida pelo fabricante e obtida por extrapolação de dados de um modelo em escala reduzida. Os fabricantes de turbinas usam relações empíricas para corrigir a eficiência do modelo, a fim de refletir melhor a eficiência do protótipo. Apesar dessa correção, o desempenho real das turbinas pode ser afetado pelas características construtivas e operacionais da planta não levadas em conta pelos fabricantes (HIDALGO et al., 2014). A menor vazão a qual a turbina opera em condições que não causem danos ao equipamento, tendo como restrição a eficiência de cada tipo de turbina é denominado vazão mínima operativa.

Este estudo propõe utilizar a metodologia apresentada pela Empresa de Pesquisa Energética (Brasil) (2013) para representação da curva colina para obtenção do rendimento da turbina. De acordo com os dados simuladas e dados de ensaio de vazão e altura das PCHs Dourados, São Joaquim, Palmeiras e Retiro apresentados nas Tabelas 4, 5, 6 e 7, foram criadas funções polinomiais representativas. Essas funções de eficiências foram obtidas utilizando o MMQ. A escolha das funções (2^a ou 3^a ordem) que melhor representam a eficiência da turbina foi feita com base nas melhores métricas estatísticas, como o coeficiente de determinação (R^2), a raiz do erro quadrático médio ($RMSE$), o desvio padrão (STD) e o erro médio absoluto ($RMSD$).

Tabela 4 – Dados Simulados de Ensaio da Turbina da PCH Dourados

| Vazão (m ³ /s) | Perdas de Carga (m) | Queda Líquida (m) | Rendimento Turbina (%) | Potência Turbina (MW) | Rendimento Gerador (%) | Rendimento Global (%) | Potência Gerada (MW) |
|------------------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 44,00 | 0,00 | 29,50 | 92,00 | 10,12 | 97,20 | 89,42 | 9,836 |
| 42,47 | 0,00 | 29,29 | 91,41 | 10,06 | 97,18 | 88,83 | 9,771 |
| 40,94 | 0,00 | 29,08 | 90,82 | 9,99 | 97,15 | 88,24 | 9,706 |
| 39,41 | 0,01 | 28,88 | 90,24 | 9,93 | 97,13 | 87,65 | 9,640 |
| 37,88 | 0,01 | 28,67 | 89,65 | 9,86 | 97,11 | 87,05 | 9,575 |
| 36,35 | 0,01 | 28,46 | 89,06 | 9,80 | 97,08 | 86,46 | 9,510 |
| 34,82 | 0,01 | 28,25 | 88,47 | 9,73 | 97,06 | 85,87 | 9,445 |
| 33,29 | 0,01 | 28,04 | 87,88 | 9,67 | 97,04 | 85,28 | 9,380 |
| 31,76 | 0,02 | 27,84 | 87,29 | 9,60 | 97,01 | 84,69 | 9,315 |
| 30,24 | 0,02 | 27,63 | 86,71 | 9,54 | 96,99 | 84,09 | 9,250 |
| 28,71 | 0,02 | 27,42 | 86,12 | 9,47 | 96,96 | 83,50 | 9,185 |
| 27,18 | 0,02 | 27,21 | 85,53 | 9,41 | 96,94 | 82,91 | 9,120 |
| 25,65 | 0,02 | 27,00 | 84,94 | 9,34 | 96,92 | 82,32 | 9,055 |
| 24,12 | 0,03 | 26,80 | 84,35 | 9,28 | 96,89 | 81,73 | 8,990 |
| 22,59 | 0,03 | 26,59 | 83,76 | 9,21 | 96,87 | 81,14 | 8,925 |
| 21,06 | 0,03 | 26,38 | 83,18 | 9,15 | 96,85 | 80,55 | 8,860 |
| 19,53 | 0,03 | 26,17 | 82,59 | 9,08 | 96,82 | 79,96 | 8,796 |
| 18,00 | 0,04 | 25,97 | 82,00 | 9,02 | 96,80 | 79,38 | 8,731 |

Fonte: Dados simulados de Projeto da PCH Dourados

Tabela 5 – Dados Simulados de Ensaio da Turbina da PCH São Joaquim

| Vazão (m ³ /s) | Perdas de Carga (m) | Queda Líquida (m) | Rendimento Turbina (%) | Potência Turbina (MW) | Rendimento Gerador (%) | Rendimento Global (%) | Potência Gerada (MW) |
|------------------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 18,33 | 0,10 | 17,05 | 92,00 | 2,57 | 97,00 | 89,24 | 2,30 |
| 17,50 | 0,09 | 16,85 | 91,60 | 2,44 | 96,85 | 88,82 | 2,17 |
| 16,70 | 0,08 | 16,65 | 91,20 | 2,26 | 96,75 | 88,48 | 2,06 |
| 16,00 | 0,08 | 16,50 | 90,80 | 2,10 | 96,70 | 88,13 | 1,94 |
| 15,30 | 0,07 | 16,30 | 90,40 | 1,93 | 96,65 | 87,78 | 1,82 |
| 14,60 | 0,07 | 16,10 | 90,00 | 1,77 | 96,60 | 87,43 | 1,70 |
| 14,00 | 0,06 | 15,90 | 89,60 | 1,61 | 96,55 | 87,08 | 1,58 |
| 13,30 | 0,06 | 15,70 | 89,20 | 1,45 | 96,50 | 86,73 | 1,46 |
| 12,60 | 0,05 | 15,50 | 88,80 | 1,29 | 96,45 | 86,38 | 1,34 |
| 12,00 | 0,05 | 15,30 | 88,40 | 1,13 | 96,40 | 86,03 | 1,22 |
| 11,30 | 0,04 | 15,10 | 88,00 | 0,97 | 96,35 | 85,68 | 1,10 |
| 10,60 | 0,04 | 14,90 | 87,60 | 0,81 | 96,30 | 85,33 | 0,98 |
| 10,00 | 0,03 | 14,70 | 87,20 | 0,75 | 96,25 | 84,98 | 0,87 |
| 9,30 | 0,03 | 14,50 | 86,80 | 0,69 | 96,20 | 84,63 | 0,75 |
| 8,60 | 0,02 | 14,30 | 86,40 | 0,62 | 96,15 | 84,28 | 0,63 |
| 7,90 | 0,02 | 14,10 | 86,00 | 0,56 | 96,10 | 83,93 | 0,51 |
| 7,20 | 0,02 | 13,90 | 85,60 | 0,50 | 96,05 | 83,58 | 0,39 |
| 6,50 | 0,01 | 13,70 | 85,20 | 0,43 | 96,00 | 83,23 | 0,27 |

Fonte: Dados simulados de Projeto da PCH São Joaquim

Tabela 6 – Dados de ensaio em comissionamento da Turbina da PCH Palmeiras

| Vazão (m ³ /s) | Perdas de Carga (m) | Queda Líquida (m) | Rendimento Turbina (%) | Potência Turbina (MW) | Rendimento Gerador (%) | Rendimento Global (%) | Potência Gerada (MW) |
|------------------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 115,0 | 0,41 | 9,91 | 91,77 | 10,086 | 97,00 | 89,02 | 9,783 |
| 154,5 | 0,73 | 10,75 | 92,04 | 14,788 | 97,36 | 89,61 | 14,398 |
| 150,4 | 0,69 | 10,97 | 92,35 | 14,744 | 97,36 | 89,91 | 14,355 |
| 131,5 | 0,53 | 11,31 | 92,99 | 13,369 | 97,31 | 90,49 | 13,010 |
| 115,4 | 0,41 | 11,59 | 93,10 | 12,032 | 97,22 | 90,51 | 11,698 |
| 104,3 | 0,33 | 11,79 | 92,94 | 11,033 | 97,12 | 90,26 | 10,715 |
| 93,4 | 0,27 | 11,99 | 92,71 | 10,010 | 96,99 | 89,92 | 9,709 |
| 85,6 | 0,22 | 12,13 | 92,31 | 9,234 | 96,86 | 89,41 | 8,945 |
| 75,9 | 0,18 | 12,31 | 91,30 | 8,206 | 96,63 | 88,22 | 7,930 |
| 69,3 | 0,15 | 12,43 | 90,19 | 7,467 | 96,42 | 86,96 | 7,199 |
| 63,3 | 0,12 | 12,55 | 88,96 | 6,779 | 96,17 | 85,55 | 6,519 |
| 57,3 | 0,10 | 12,66 | 87,53 | 6,083 | 95,85 | 83,90 | 5,830 |
| 52,4 | 0,08 | 12,76 | 86,24 | 5,512 | 95,52 | 82,38 | 5,265 |
| 48,1 | 0,07 | 12,84 | 84,01 | 4,951 | 95,11 | 79,90 | 4,709 |
| 44,7 | 0,06 | 12,91 | 83,96 | 4,616 | 94,82 | 79,61 | 4,377 |
| 41,7 | 0,05 | 12,97 | 83,00 | 4,269 | 94,46 | 78,40 | 4,032 |
| 38,5 | 0,05 | 13,03 | 81,92 | 3,901 | 94,00 | 77,01 | 3,667 |
| 34,8 | 0,04 | 13,11 | 80,63 | 3,479 | 93,36 | 75,27 | 3,248 |

Fonte: ANEEL (2022)

Tabela 7 – Dados de ensaio em comissionamento da Turbina da PCH Retiro

| Vazão (m ³ /s) | Perda de Carga (m) | Queda Líquida (m) | Rendimento Turbina (%) | Potência Total (KW) | Rendimento Gerador (%) | Rendimento Global (%) | Potência Gerada (MW) |
|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 154,5 | 0,73 | 10,69 | 91,44 | 14.967 | 87,46 | 89,12 | 14,505 |
| 154,5 | 0,73 | 11,59 | 92,24 | 15.090 | 87,50 | 89,94 | 15,587 |
| 154,5 | 0,73 | 11,73 | 92,38 | 15.300 | 87,50 | 90,07 | 15,900 |
| 136,7 | 0,57 | 12,00 | 92,77 | 14.823 | 87,45 | 90,42 | 14,447 |
| 120,0 | 0,44 | 12,24 | 92,74 | 13.259 | 87,41 | 90,33 | 12,925 |
| 108,4 | 0,35 | 12,38 | 92,44 | 12.095 | 87,34 | 89,98 | 11,774 |
| 97,1 | 0,29 | 12,54 | 92,14 | 10.931 | 97,21 | 89,57 | 10,525 |
| 89,0 | 0,24 | 12,54 | 91,74 | 10.052 | 97,11 | 89,08 | 9,751 |
| 78,9 | 0,19 | 12,75 | 90,75 | 9.901 | 95,92 | 87,85 | 8,527 |
| 72,4 | 0,15 | 12,84 | 89,55 | 9.097 | 95,74 | 85,74 | 7,824 |
| 65,9 | 0,13 | 12,91 | 88,37 | 7.323 | 95,50 | 85,27 | 7,066 |
| 59,6 | 0,11 | 12,92 | 85,82 | 5.544 | 95,20 | 83,52 | 5,295 |
| 54,5 | 0,09 | 13,04 | 85,39 | 5.912 | 96,27 | 82,21 | 5,591 |
| 50,0 | 0,08 | 13,08 | 83,99 | 5.333 | 85,98 | 80,62 | 5,138 |
| 46,6 | 0,07 | 13,12 | 82,85 | 4.937 | 95,38 | 70,03 | 4,709 |
| 43,4 | 0,06 | 13,15 | 81,71 | 4.544 | 94,74 | 77,41 | 4,305 |
| 40,1 | 0,05 | 13,18 | 80,45 | 4.142 | 94,31 | 75,87 | 3,907 |
| 36,2 | 0,04 | 13,22 | 78,85 | 3.677 | 93,70 | 73,89 | 3,445 |

Fonte: ANEEL (2022)

5.3 Definição da série de vazões médias mensais a partir dos dados diários de vazões nos postos fluviométricos.

A metodologia aplicada neste estudo envolve o uso de dados de vazão da série histórica de 2013 a 2024 das estações fluviométricas que estão localizadas na região de influência hidrológica das PCHs em estudo. Os dados foram obtidos no sítio da *HidroWeb* (2025). Com os dados diários de vazão dos postos fluviométricos, apresentado na Tabela 8, foram obtidas as correspondentes séries de vazões médias mensais, que são apresentadas nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 8 – Postos Fluviométricos

| PCH | Posto Fluviométrico |
|------------------------|--|
| Dourados e São Joaquim | PCH Dourados Santo Antônio da Alegria (61772000) |
| | PCH Dourados Montante (61776900) |
| | PCH Dourados Jusante (61782100) |
| Palmeiras e Retiro | Fazenda São Domingos (61787500) |
| | São Domingos (61788000) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em ANA (2025)

Para o estudo de vazão das PCHs Dourados e PCH São Joaquim, foram utilizados os dados das estações fluviométricas PCH Dourados Santo Antônio Da Alegria (61772000),

PCH Dourados Montante (61776900) e PCH Dourados Jusante (61782100). A estação Dourados Montante (61776900) foi adotada como estação base dos empreendimentos, por apresentarem dados mais consistentes e corresponderem a área de drenagem da bacia das PCHs. Nesse sentido como a área de drenagem da PCH Dourados e PCH São Joaquim são da mesma ordem de grandeza, considerou-se iguais. A série de vazões médias mensais dessa estação abrange o período de janeiro de 2013 a 2023. As falhas existentes na estação Dourados Montante (61776900) foram preenchidas por correlação de dados com demais estações.

Tabela 9 – Vazões médias mensais das estações fluviométricas considerados para as PCH Dourados e São Joaquim

| ANO | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ | Média |
|---------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|---------|
| 2013 | 633,07 | 593,47 | 474,15 | 343,49 | 241,81 | 207,17 | 158,25 | 101,34 | 5,29 | 149,84 | 156,24 | 197,29 | 271,78 |
| 2014 | 138,80 | 115,26 | 142,36 | 136,36 | 57,78 | 43,60 | 76,74 | 46,30 | 33,65 | 11,85 | 72,56 | 204,60 | 89,99 |
| 2015 | 136,05 | 116,42 | 120,77 | 174,91 | 161,30 | 118,43 | 69,97 | 21,85 | 26,70 | 32,59 | 114,28 | 214,07 | 108,94 |
| 2016 | 434,15 | 509,64 | 740,82 | 252,81 | 28,93 | 86,53 | 110,93 | 99,76 | 63,35 | 125,94 | 195,96 | 230,18 | 239,92 |
| 2017 | 500,27 | 430,35 | 429,75 | 284,53 | 224,65 | 80,09 | 176,62 | 99,78 | 66,94 | 77,18 | 117,25 | 137,00 | 218,70 |
| 2018 | 486,81 | 252,63 | 277,66 | 171,13 | 114,13 | 93,85 | 73,74 | 83,54 | 69,54 | 163,39 | 246,79 | 202,85 | 186,34 |
| 2019 | 242,18 | 139,99 | 592,64 | 487,85 | 352,03 | 74,62 | 48,34 | 28,46 | 25,87 | 9,04 | 96,83 | 153,85 | 187,64 |
| 2020 | 420,45 | 607,40 | 452,22 | 241,64 | 166,81 | 115,32 | 77,90 | 54,04 | 34,82 | 41,48 | 68,56 | 226,69 | 208,94 |
| 2021 | 232,34 | 127,86 | 153,39 | 77,12 | 53,73 | 48,87 | 34,89 | 31,07 | 23,04 | 148,69 | 179,86 | 167,43 | 106,52 |
| 2022 | 346,09 | 513,72 | 267,37 | 233,50 | 148,12 | 101,26 | 71,30 | 52,60 | 46,14 | 91,96 | 111,65 | 502,60 | 207,19 |
| 2023 | 1499,92 | 952,88 | 663,60 | 350,81 | 202,41 | 171,02 | 114,79 | 88,89 | 68,54 | 125,61 | 146,60 | 235,77 | 385,07 |
| 2024 | 1505,85 | 960,45 | 670,50 | 355,62 | 205,37 | 172,84 | 119,23 | 85,76 | 69,98 | 132,12 | 150,43 | 245,31 | 389,46 |
| Mínimo | 136,05 | 115,26 | 120,77 | 77,12 | 28,93 | 43,60 | 34,89 | 21,85 | 5,29 | 9,04 | 68,56 | 137,00 | 5,29 |
| Média | 548,00 | 443,34 | 415,44 | 259,15 | 163,09 | 109,47 | 94,39 | 66,12 | 44,49 | 92,47 | 138,08 | 226,47 | 216,71 |
| Máximo | 1505,85 | 960,45 | 740,82 | 487,85 | 352,03 | 207,17 | 176,62 | 101,34 | 69,98 | 163,39 | 246,79 | 502,60 | 1505,85 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em ANA (2025)

Para o estudo de vazão das PCHs Palmeiras e Retiro, foram utilizados os dados das estações fluviométricas Fazenda São Domingos (61787500) e São Domingos (61788000). A estação São Domingos (61788000) foi adotada como estação base dos empreendimentos. Da mesma forma, a área de drenagem das PCHs Palmeiras e Retiro são da mesma ordem de grandeza, considerou-se iguais. A série de vazões médias mensais dessa estação abrange o período de janeiro de 2013 a dezembro de 2023. As falhas existentes na estação São Domingos (61788000) foram preenchidas por correlação de dados com a estação Fazenda São Domingos (61787500). A Tabela 10 apresenta a série histórica de vazão afluente dos anos de 2000 a 2024 consideradas para estudo da PCH Palmeiras e Retiro.

Tabela 10 – Vazões médias mensais das estações fluviométricas consideradas para PCH Palmeiras e Retiro

| ANO | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ | Média |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 2013 | 99,25 | 152,45 | 167,55 | 156,99 | 106,76 | 134,78 | 66,51 | 51,49 | 44,38 | 49,64 | 66,53 | 86,99 | 98,6 |
| 2014 | 78,69 | 55,07 | 58,29 | 56,65 | 40,28 | 35,83 | 29,90 | 25,28 | 20,38 | 15,49 | 28,64 | 71,56 | 43,0 |
| 2015 | 44,79 | 70,69 | 91,59 | 97,74 | 82,67 | 62,00 | 48,25 | 33,24 | 42,78 | 28,43 | 58,34 | 107,50 | 64,0 |
| 2016 | 226,30 | 194,23 | 243,05 | 130,88 | 104,76 | 98,34 | 61,65 | 48,36 | 45,41 | 42,46 | 62,44 | 66,43 | 110,4 |
| 2017 | 110,24 | 135,56 | 105,54 | 77,80 | 71,05 | 47,01 | 37,38 | 29,68 | 21,52 | 21,81 | 42,61 | 93,62 | 66,2 |
| 2018 | 179,88 | 121,34 | 163,27 | 86,85 | 73,78 | 51,84 | 40,29 | 35,81 | 31,33 | 47,89 | 123,26 | 141,56 | 91,4 |
| 2019 | 106,82 | 150,69 | 225,02 | 199,08 | 126,66 | 85,72 | 39,83 | 31,54 | 36,77 | 45,54 | 64,54 | 75,05 | 98,9 |
| 2020 | 122,26 | 190,54 | 174,95 | 116,83 | 80,71 | 61,51 | 48,41 | 37,49 | 36,77 | 45,54 | 64,54 | 77,75 | 88,1 |
| 2021 | 83,23 | 51,90 | 75,83 | 49,65 | 80,44 | 64,39 | 20,12 | 20,43 | 20,73 | 53,35 | 67,60 | 65,62 | 54,4 |
| 2022 | 132,18 | 256,83 | 163,06 | 118,60 | 81,25 | 57,08 | 37,75 | 30,95 | 33,32 | 55,27 | 37,12 | 112,93 | 93,0 |
| 2023 | 133,45 | 157,72 | 158,24 | 106,21 | 83,65 | 62,44 | 41,79 | 33,25 | 34,26 | 51,92 | 61,53 | 98,27 | 85,2 |
| 2024 | 118,82 | 140,05 | 143,21 | 95,82 | 75,15 | 55,98 | 37,57 | 29,94 | 30,82 | 46,66 | 55,25 | 87,84 | 76,4 |
| Mínimo | 44,79 | 51,90 | 58,29 | 49,65 | 40,28 | 35,83 | 20,12 | 20,43 | 20,38 | 15,49 | 28,64 | 65,62 | 15,49 |
| Média | 119,66 | 139,76 | 147,47 | 107,76 | 83,93 | 68,08 | 42,46 | 33,95 | 33,21 | 42,00 | 61,03 | 90,43 | 80,81 |
| Máximo | 226,30 | 256,83 | 243,05 | 199,08 | 126,66 | 134,78 | 66,51 | 51,49 | 45,41 | 55,27 | 123,26 | 141,56 | 256,83 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em ANA (2025)

Para plotar as curvas de Permanência de vazão os dados da série histórica de vazões mensais foram organizados em ordem decrescente. Para cada valor de vazão Q_i na lista ordenada, o percentual de excedência (P) é dado pela Equação (47):

$$P_i = \frac{i}{N} \times 100 \quad (47)$$

Onde:

i é a posição do valor Q_i na lista em ordem decrescente;

N é o total de observações na série de dados.

Para plotar a curva considera-se no eixo x , o percentual de tempo (P) de excedência (0% a 100%) e no eixo y , considera-se os valores de vazão (Q_i).

A Figura 31 apresenta a curva de permanência de vazão das PCHs Dourados e São Joaquim e a Figura 32 apresenta a curva de permanência de vazão da PCH Palmeiras e Retiro. Os gráficos exibem a relação entre a vazões médias acumuladas em função do tempo, representada em termos percentuais. A curva da Figura 31 tem variações crescentes de vazão ao longo do tempo, indicando que valores mais elevados de vazão ocorrem com menor frequência. Em 40% do tempo, observa-se um aumento relativamente lento da vazão, o que sugere que vazão moderadas, em torno de $130 \text{ m}^3/\text{s}$ ocorrem com maior frequência. A curva da Figura 32 indica que, entre 14% e 85% do tempo, a vazão operacional das PCHs Retiro e Palmeiras está assegurada, correspondendo a $154,5 \text{ m}^3/\text{s}$ e $32,5 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente.

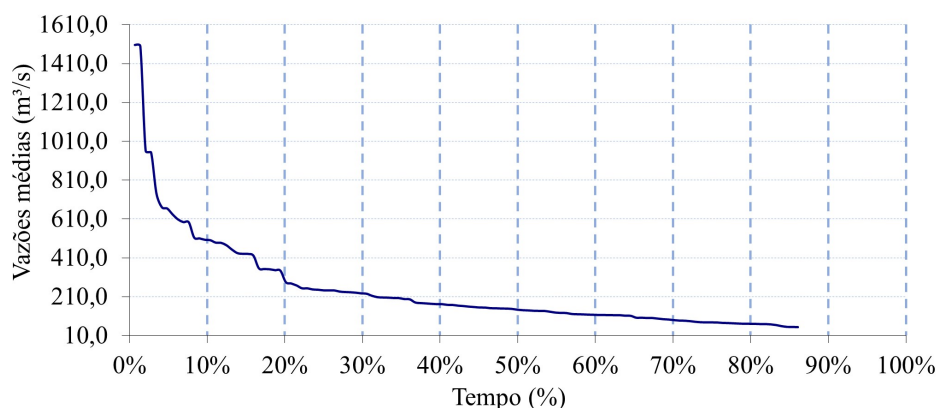


Figura 31 – Curva de Permanência de Vazões Médias para a PCH Dourados e PCH São Joaquim

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

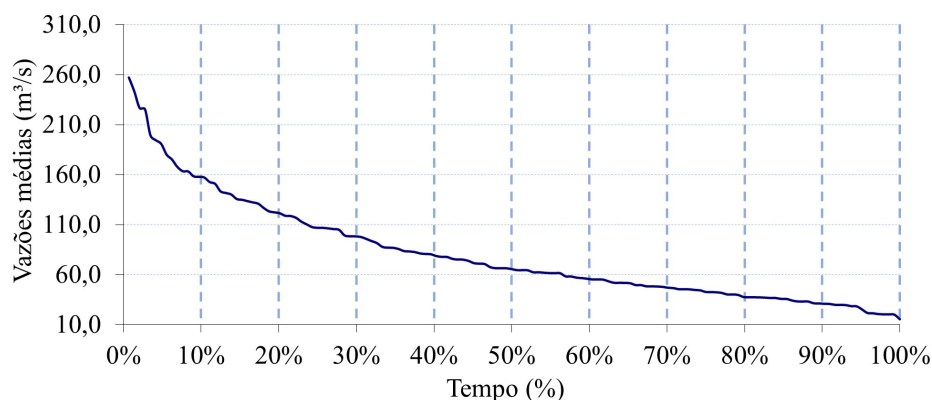


Figura 32 – Curva de Permanência de Vazões Médias para a PCH Palmeiras e PCH Retiro

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

5.4 Cálculo da altura líquida (H_t) de queda d'água das PCHs em cascata

Esta seção apresenta a metodologia empregada para a obtenção da altura líquida de queda d'água, considerando a altura disponível em correlação com a disponibilidade de vazão.

5.4.1 Cálculo da altura disponível (H)

As Tabelas 11, 12, 13 e 14 apresentam uma relação entre vazão e cota de nível jusante fornecidas pela ANEEL (Dados de projeto) e medidas no próprio empreendimento. Esses dados foram obtidos a partir de medições realizadas no empreendimento em diferentes

períodos e condições de operação. Em seguida foram organizados em ordem crescente de vazão e assim pode-se obter uma curva de descarga do canal de fuga, ajustá-la e encontrar uma relação para o cálculo da altura disponível das PCHs estudadas.

Tabela 11 – Vazão *vs* Cota medida na PCH Dourados

| Vazão (m ³ /s) | Nível jusante (m) |
|---------------------------|-------------------|
| 0,41 | 588,93 |
| 8,39 | 588,91 |
| 8,66 | 588,96 |
| 18,02 | 589,04 |
| 21,17 | 589,08 |
| 24,08 | 589,08 |
| 27,48 | 589,14 |
| 31,14 | 589,20 |
| 34,85 | 589,25 |
| 38,68 | 589,34 |
| 44,35 | 589,43 |

Fonte: CPFL (2025)

Tabela 12 – Vazão *vs* Cota medida na PCH São Joaquim

| Vazão (m ³ /s) | Nível jusante (m) |
|---------------------------|-------------------|
| 10,31 | 554,914 |
| 11,68 | 554,914 |
| 13,25 | 554,919 |
| 13,64 | 554,922 |
| 14,06 | 554,923 |
| 14,40 | 554,923 |
| 15,00 | 554,920 |
| 15,29 | 554,922 |
| 16,65 | 554,925 |
| 16,06 | 554,926 |
| 18,00 | 554,929 |

Fonte: CPFL (2025)

Tabela 13 – Vazão *vs* Cota medida na PCH Palmeiras

| Vazão (m ³ /s) | Nível jusante (m) |
|---------------------------|-------------------|
| 28,0 | 541,32 |
| 32,8 | 541,41 |
| 36,8 | 541,49 |
| 40,5 | 541,56 |
| 43,7 | 541,61 |
| 46,7 | 541,67 |
| 50,1 | 541,73 |
| 54,4 | 541,80 |
| 59,3 | 541,88 |
| 65,3 | 541,98 |
| 71,3 | 542,07 |
| 77,9 | 542,16 |
| 87,6 | 542,30 |
| 95,4 | 542,40 |
| 106,3 | 542,54 |
| 117,4 | 542,66 |
| 133,5 | 542,83 |
| 152,4 | 543,00 |
| 175,2 | 543,18 |
| 345,0 | 543,95 |

Fonte: ANEEL (2025a)

Tabela 14 – Vazão *vs* Cota medida na PCH Retiro

| Vazão (m ³ /s) | Nível jusante (m) |
|---------------------------|-------------------|
| 29,1 | 509,16 |
| 34,1 | 509,20 |
| 38,2 | 509,24 |
| 42,1 | 509,27 |
| 45,4 | 509,29 |
| 48,6 | 509,31 |
| 52,0 | 509,34 |
| 56,5 | 509,37 |
| 61,6 | 509,41 |
| 67,9 | 509,46 |
| 74,1 | 509,50 |
| 80,9 | 509,55 |
| 91,0 | 509,62 |
| 99,1 | 509,67 |
| 110,4 | 509,75 |
| 122,0 | 509,82 |
| 138,7 | 509,93 |
| 158,3 | 510,04 |
| 182,1 | 510,18 |
| 358,5 | 510,88 |

Fonte: ANEEL (2025a)

Através do MMQ, descrito na seção 4.1.1.1 ajustou-se as curvas obtendo uma equação polinomial de 2ª ordem. O objetivo é encontrar os coeficientes do polinômio que minimizem a soma dos quadrados dos resíduos entre os valores medidos e os valores preditos. O MMQ é um procedimento para determinar a melhor linha de ajuste aos dados, descrito por Griffiths e Smith (1991). Foi calculado o coeficiente de determinação (R^2) para verificar o quão bem os valores dependentes previstos se relacionam com os valores medidos (Miller e Griffiths e Smith (1991)).

Os parâmetros da equação de 2ª ordem, obtidos pelo MMQ com o ajuste da curva-chave, para as PCHs Dourados, São Joaquim, Palmeiras e Retiro são apresentadas, respectivamente, nas Equações (48), (49), (50) e (51). Essas Equações relacionam o nível da vazão das PCHs em termos de cota, referenciada ao nível do mar.

$$f(x) = -0,0002 \times 10^{-5}x^2 + 0,0025x + 588,6 \quad (48)$$

$$f(x) = -2,0 \times 10^{-5}x^2 + 0,0025x + 554,89 \quad (49)$$

$$f(x) = -2,761 \times 10^{-5}x^2 - 0,01841x + 540,9 \quad (50)$$

$$f(x) = -7,637 \times 10^{-6}x^2 + 0,008158x + 508,9 \quad (51)$$

A partir dos dados das Tabelas 11, 12, 13 e 14 foram criadas curva-chave representativas. As Figuras 33, 34, 35 e 36 apresentam, de forma gráfica, os resultados das medições. Cada ponto no gráfico corresponde a uma medida de vazão (pontos cinzas) e sua correspondente cota que representa o nível d'água. A linha pontilhada representa a curva-chave ajustada pelo MMQ. Essa metodologia permite entender como a vazão varia em função do nível jusante. Observar padrões e tendências é essencial para a compreensão do comportamento hidráulico do sistema.

Para determinar a altura de disponível (H) das PCHs, subtrai-se o valor obtido nas Equações (48), (49), (50) e (51) da cota máxima normal a montante (NA_{mont}) em relação ao nível do mar. As Equações (52), (53), (54) e (55) calculam a altura disponível de água para as PCHs Dourados, São Joaquim, Palmeiras e Retiro, respectivamente.

$$H = NA_{mont} - (-0,002 \times 10^{-5}Q^2 + 0,0025Q + 588,6) \quad (52)$$

$$H = NA_{mont} - (-2,0 \times 10^{-5}Q^2 + 0,0025Q + 554,89) \quad (53)$$

$$H = NA_{mont} - (-2,761 \times 10^{-5}Q^2 - 0,01841Q + 540,9) \quad (54)$$

$$H = NA_{mont} - (-7,637 \times 10^{-6}Q^2 + 0,008158Q + 508,9) \quad (55)$$

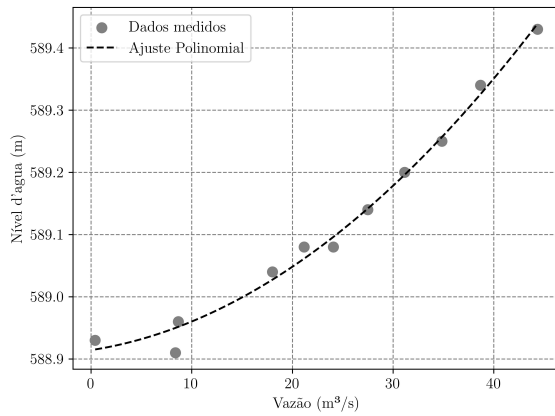


Figura 33 – Curva característica de descarga do canal de fuga da PCH Dourados

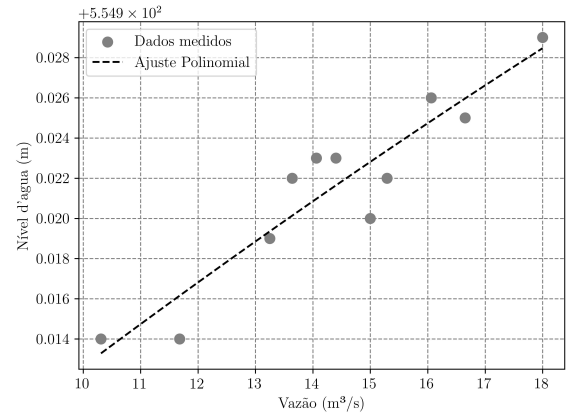


Figura 34 – Curva característica de descarga do canal de fuga da PCH São Joaquim

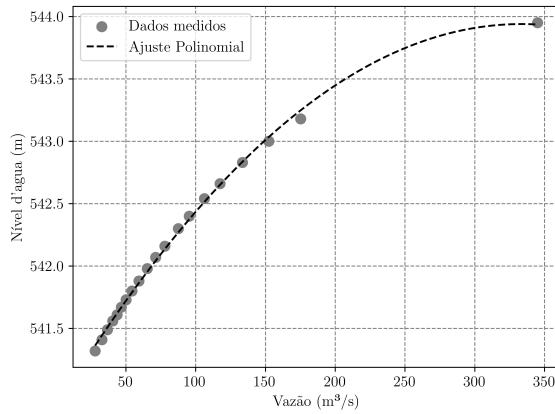


Figura 35 – Curva característica de descarga do canal de fuga da PCH Palmeiras

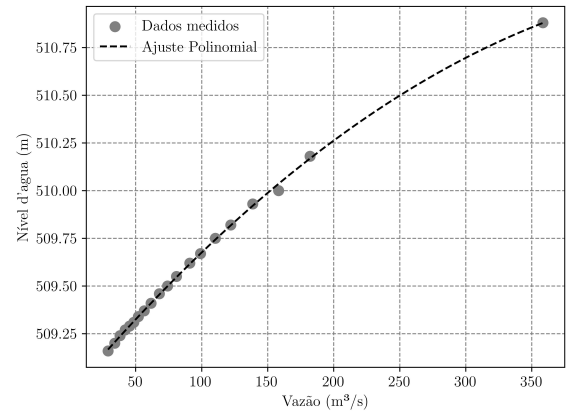


Figura 36 – Curva característica de descarga do canal de fuga da PCH Retiro

Onde,

H representa a altura de água disponível para PCH,

NA_{mont} é a cota máxima normal a montante. Conforme os projetos base, aprovado pela ANEEL, a NA_{mont} das PCHs em relação ao nível do mar, podem ser consultados na Tabela 3.

Para avaliar a qualidade do ajuste dos modelos às séries históricas da altura de queda das PCHs, obtidas a partir das funções polinomiais apresentadas nas Equações (48), (49), (50) e (51), foram analisados o Coeficiente de Determinação (R^2), o Erro Mínimo Quadrado e o Erro Médio Quadrático (RMSE), conforme mostrado na Tabela 15. O R^2 expressa a capacidade do modelo em explicar a variabilidade dos dados, enquanto o RMSE quantifica a precisão preditiva, medindo a dispersão dos erros entre os valores estimados e observados.

Considerando as vazões médias mensais das obtidas das estações fluviométricas, fez-se o cálculo da altura disponível (H) para o empreendimento a partir das Equações (52),

Tabela 15 – Coeficiente de Determinação das PCHs em estudo.

| PCH | R ² | Erro Mínimo Quadrado | Erro (RMSE) |
|-------------|----------------|----------------------|-------------|
| Dourados | 0,9469 | 0,1640 | 0,0820 |
| São Joaquim | 0,8730 | 0,0052 | 0,0015 |
| Palmeiras | 0,9983 | 0,1196 | 0,0267 |
| Retiro | 0,9994 | 0,0421 | 0,0094 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

(53), (54) e (55). Obteve-se os valores apresentados nas Tabelas 16, 17, 18 e 19 para as PCHs Dourados, São Joaquim, Palmeiras e Retiro, respectivamente.

Tabela 16 – Altura disponível (H) para PCH Dourados.

| ANO | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ | Média |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2013 | 28,52 | 29,75 | 29,76 | 29,02 | 28,85 | 28,88 | 29,49 | 29,05 | 29,52 | 29,24 | 26,35 | 26,34 | 28,89 |
| 2014 | 28,62 | 29,81 | 29,81 | 28,83 | 29,02 | 29,47 | 29,75 | 28,58 | 29,78 | 28,82 | 27,72 | 27,70 | 28,74 |
| 2015 | 28,92 | 29,74 | 29,80 | 28,25 | 29,03 | 29,41 | 28,62 | 28,97 | 29,72 | 29,43 | 28,44 | 28,42 | 28,84 |
| 2016 | 29,24 | 29,76 | 29,66 | 29,47 | 29,39 | 29,67 | 28,88 | 29,50 | 29,91 | 29,52 | 29,22 | 29,21 | 29,52 |
| 2017 | 29,50 | 29,96 | 29,70 | 30,03 | 29,54 | 29,81 | 29,22 | 29,68 | 29,97 | 29,73 | 29,59 | 29,59 | 29,74 |
| 2018 | 29,58 | 29,99 | 29,80 | 29,88 | 29,90 | 29,87 | 29,91 | 29,81 | 29,98 | 29,85 | 29,67 | 29,67 | 29,81 |
| 2019 | 29,70 | 29,91 | 29,93 | 29,82 | 29,66 | 29,92 | 29,98 | 29,91 | 30,01 | 29,92 | 29,81 | 29,80 | 29,88 |
| 2020 | 29,85 | 29,98 | 30,05 | 29,85 | 29,85 | 29,89 | 30,03 | 29,96 | 30,02 | 29,97 | 29,88 | 29,89 | 29,94 |
| 2021 | 30,09 | 30,02 | 30,03 | 29,94 | 29,93 | 29,93 | 30,04 | 30,01 | 30,04 | 29,98 | 29,93 | 29,93 | 30,00 |
| 2022 | 29,73 | 30,07 | 30,02 | 29,79 | 29,91 | 29,69 | 30,08 | 30,00 | 29,73 | 29,87 | 29,79 | 29,77 | 29,84 |
| 2023 | 29,71 | 29,92 | 29,81 | 29,61 | 29,81 | 29,48 | 29,86 | 29,93 | 29,65 | 29,82 | 29,73 | 29,72 | 29,76 |
| 2024 | 29,61 | 29,59 | 29,56 | 29,52 | 29,76 | 29,59 | 29,72 | 29,53 | 29,68 | 28,84 | 29,51 | 29,49 | 29,59 |
| Mínimo | 28,52 | 29,59 | 29,56 | 28,25 | 28,85 | 28,48 | 28,62 | 28,58 | 29,52 | 28,82 | 26,35 | 26,34 | 28,74 |
| Média | 29,16 | 29,79 | 29,79 | 29,18 | 29,16 | 29,48 | 29,61 | 29,58 | 29,74 | 29,62 | 29,68 | 29,64 | 29,59 |
| Máximo | 30,09 | 30,07 | 30,05 | 30,03 | 29,93 | 29,92 | 30,08 | 30,01 | 30,02 | 29,98 | 29,93 | 29,93 | 30,09 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 17 – Altura disponível (H) para PCH São Joaquim

| ANO | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ | Média |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2013 | 25,04 | 24,17 | 21,92 | 20,11 | 19,17 | 18,95 | 18,72 | 18,56 | 18,60 | 18,68 | 18,71 | 18,90 | 20,47 |
| 2014 | 18,65 | 18,59 | 18,66 | 18,64 | 18,53 | 18,54 | 18,54 | 18,54 | 18,55 | 18,58 | 18,53 | 18,94 | 18,60 |
| 2015 | 18,64 | 18,59 | 18,60 | 18,78 | 18,73 | 18,59 | 18,53 | 18,56 | 18,56 | 18,55 | 18,59 | 18,99 | 18,63 |
| 2016 | 21,29 | 22,53 | 27,73 | 19,26 | 18,55 | 18,54 | 18,58 | 18,56 | 18,53 | 18,61 | 18,89 | 19,09 | 20,20 |
| 2017 | 22,36 | 21,24 | 21,23 | 19,52 | 19,06 | 18,54 | 18,79 | 18,56 | 18,53 | 18,54 | 18,59 | 18,64 | 19,18 |
| 2018 | 22,13 | 19,25 | 19,46 | 18,77 | 18,59 | 18,55 | 18,53 | 18,54 | 18,53 | 18,74 | 19,21 | 18,93 | 19,06 |
| 2019 | 19,18 | 18,65 | 24,15 | 22,15 | 20,21 | 18,53 | 18,54 | 18,56 | 18,56 | 18,59 | 18,56 | 18,70 | 19,09 |
| 2020 | 21,09 | 24,47 | 21,57 | 19,17 | 18,75 | 18,59 | 18,54 | 18,53 | 18,55 | 18,54 | 18,53 | 19,07 | 19,04 |
| 2021 | 19,11 | 18,62 | 18,70 | 18,54 | 18,53 | 18,54 | 18,55 | 18,55 | 18,56 | 18,68 | 18,81 | 18,75 | 18,63 |
| 2022 | 20,14 | 22,60 | 19,37 | 19,12 | 18,68 | 18,56 | 18,53 | 18,53 | 18,54 | 18,55 | 18,58 | 22,41 | 19,55 |
| 2023 | 59,86 | 34,39 | 25,76 | 20,19 | 18,92 | 18,77 | 18,59 | 18,55 | 18,53 | 18,61 | 18,67 | 19,13 | 25,45 |
| 2024 | 60,20 | 34,66 | 25,93 | 20,25 | 18,94 | 18,78 | 18,60 | 18,54 | 18,53 | 18,63 | 18,69 | 19,20 | 25,77 |
| Mínimo | 18,65 | 18,59 | 18,60 | 18,11 | 18,53 | 18,54 | 18,53 | 18,53 | 18,53 | 18,54 | 18,53 | 18,90 | 18,53 |
| Média | 20,47 | 20,12 | 21,81 | 19,29 | 18,97 | 18,81 | 18,79 | 18,73 | 18,73 | 18,81 | 18,79 | 19,25 | 19,18 |
| Máximo | 60,20 | 34,66 | 27,73 | 22,15 | 20,21 | 18,95 | 18,72 | 18,56 | 18,60 | 18,68 | 18,89 | 22,41 | 25,77 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 18 – Altura disponível (H) para PCH Palmeiras

| ANO | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ | Média |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2013 | 27,20 | 28,55 | 28,96 | 28,67 | 27,38 | 28,08 | 26,45 | 26,12 | 25,97 | 26,08 | 26,45 | 26,91 | 27,26 |
| 2014 | 26,72 | 26,20 | 26,27 | 26,23 | 25,89 | 25,80 | 25,68 | 25,58 | 25,49 | 25,39 | 25,65 | 26,56 | 25,69 |
| 2015 | 25,98 | 26,54 | 27,02 | 27,16 | 26,81 | 26,35 | 26,05 | 25,74 | 25,94 | 25,65 | 26,27 | 27,40 | 26,27 |
| 2016 | 30,68 | 29,72 | 31,21 | 27,98 | 27,33 | 27,18 | 26,34 | 26,05 | 25,99 | 25,93 | 26,36 | 26,44 | 27,49 |
| 2017 | 27,47 | 28,10 | 27,35 | 26,70 | 26,55 | 26,03 | 25,83 | 25,67 | 25,51 | 25,51 | 25,93 | 27,07 | 26,34 |
| 2018 | 29,30 | 27,74 | 28,84 | 26,91 | 26,61 | 26,13 | 25,89 | 25,79 | 25,70 | 26,04 | 27,79 | 28,26 | 27,08 |
| 2019 | 27,38 | 28,50 | 30,64 | 29,86 | 27,87 | 26,88 | 25,88 | 25,71 | 25,81 | 26,00 | 26,40 | 26,64 | 27,29 |
| 2020 | 27,76 | 29,61 | 29,17 | 27,63 | 26,77 | 26,34 | 26,06 | 25,83 | 25,81 | 26,00 | 26,40 | 26,70 | 27,15 |
| 2021 | 26,82 | 26,13 | 26,65 | 26,08 | 26,76 | 26,40 | 25,48 | 25,49 | 25,49 | 26,16 | 26,47 | 26,43 | 26,23 |
| 2022 | 28,02 | 31,65 | 28,84 | 27,67 | 26,78 | 26,24 | 25,83 | 25,70 | 25,74 | 26,20 | 25,82 | 27,53 | 27,37 |
| 2023 | 28,05 | 28,69 | 28,70 | 27,37 | 26,83 | 26,36 | 25,92 | 25,74 | 25,76 | 26,13 | 26,34 | 27,18 | 27,06 |
| 2024 | 27,68 | 28,22 | 28,30 | 27,12 | 26,64 | 26,22 | 25,83 | 25,68 | 25,69 | 26,02 | 26,20 | 26,93 | 26,55 |
| Mínimo | 25,98 | 25,80 | 25,68 | 25,58 | 25,49 | 25,39 | 25,48 | 25,49 | 25,49 | 25,39 | 25,65 | 26,43 | 25,69 |
| Média | 27,61 | 27,81 | 28,36 | 27,37 | 26,72 | 26,33 | 25,97 | 25,76 | 25,70 | 25,91 | 26,37 | 26,92 | 26,44 |
| Máximo | 30,68 | 31,65 | 31,21 | 29,86 | 27,87 | 28,08 | 26,45 | 26,12 | 25,97 | 26,16 | 27,79 | 28,26 | 30,68 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 19 – Altura disponível (H) para PCH Retiro

| ANO | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ | Média |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2013 | 12,37 | 12,03 | 11,95 | 12,01 | 12,32 | 12,14 | 12,59 | 12,70 | 12,75 | 12,71 | 12,59 | 12,45 | 12,37 |
| 2014 | 12,51 | 12,67 | 12,65 | 12,66 | 12,78 | 12,82 | 12,86 | 12,90 | 12,94 | 12,98 | 12,87 | 12,56 | 12,75 |
| 2015 | 12,75 | 12,56 | 12,42 | 12,38 | 12,48 | 12,62 | 12,72 | 12,84 | 12,76 | 12,87 | 12,65 | 12,31 | 12,60 |
| 2016 | 11,64 | 11,80 | 11,57 | 12,16 | 12,33 | 12,37 | 12,63 | 12,72 | 12,75 | 12,77 | 12,62 | 12,59 | 12,32 |
| 2017 | 12,29 | 12,13 | 12,32 | 12,51 | 12,56 | 12,73 | 12,81 | 12,86 | 12,93 | 12,93 | 12,77 | 12,40 | 12,57 |
| 2018 | 11,88 | 12,22 | 11,97 | 12,45 | 12,54 | 12,70 | 12,78 | 12,82 | 12,85 | 12,73 | 12,21 | 12,10 | 12,44 |
| 2019 | 12,32 | 12,04 | 11,65 | 11,78 | 12,19 | 12,46 | 12,79 | 12,85 | 12,81 | 12,74 | 12,61 | 12,53 | 12,55 |
| 2020 | 12,22 | 11,82 | 11,91 | 12,25 | 12,49 | 12,63 | 12,72 | 12,80 | 12,81 | 12,74 | 12,61 | 12,51 | 12,59 |
| 2021 | 12,47 | 12,70 | 12,53 | 12,71 | 12,49 | 12,61 | 12,94 | 12,94 | 12,93 | 12,69 | 12,58 | 12,60 | 12,68 |
| 2022 | 12,16 | 11,51 | 11,97 | 12,24 | 12,49 | 12,66 | 12,80 | 12,85 | 12,84 | 12,67 | 12,81 | 12,28 | 12,59 |
| 2023 | 12,15 | 12,00 | 12,00 | 12,32 | 12,47 | 12,62 | 12,77 | 12,84 | 12,83 | 12,70 | 12,63 | 12,37 | 12,49 |
| 2024 | 12,24 | 12,11 | 12,09 | 12,39 | 12,53 | 12,67 | 12,80 | 12,86 | 12,86 | 12,74 | 12,67 | 12,44 | 12,56 |
| Mínimo | 11,64 | 11,51 | 11,57 | 11,78 | 12,19 | 12,14 | 12,59 | 12,70 | 12,75 | 12,69 | 12,21 | 12,10 | 12,32 |
| Média | 12,24 | 12,10 | 12,05 | 12,25 | 12,46 | 12,56 | 12,74 | 12,81 | 12,80 | 12,74 | 12,61 | 12,47 | 12,57 |
| Máximo | 12,75 | 12,70 | 12,86 | 12,94 | 12,98 | 12,94 | 12,94 | 12,90 | 12,94 | 12,98 | 12,87 | 12,84 | 12,94 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Utilizou-se a Equação (47) para obter a curva de permanência da altura disponível (H) das PCHs Dourados, São Joaquim, Palmeiras e Retiro, representadas, respectivamente, pelas Figuras 37, 38, 39 e 40.

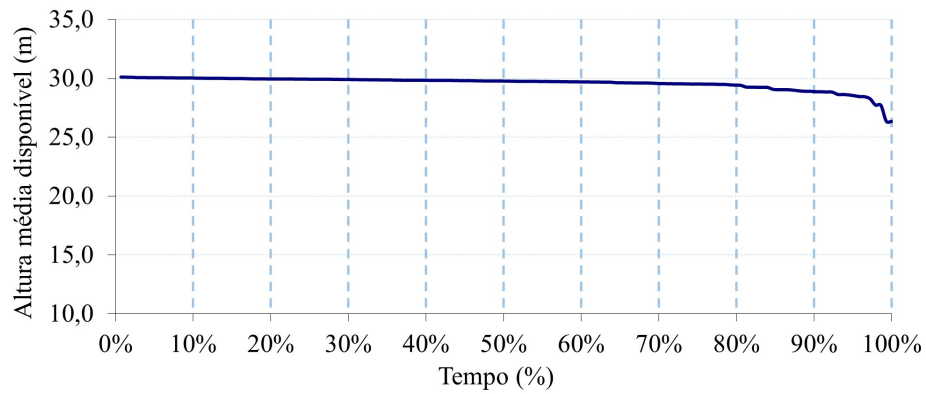


Figura 37 – Curva de permanência das alturas médias disponíveis da PCH Dourados
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

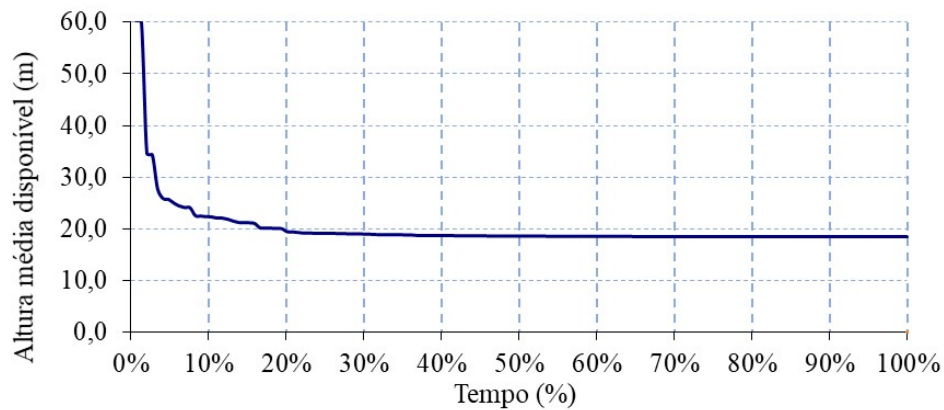


Figura 38 – Curva de permanência das alturas médias disponíveis da PCH São Joaquim
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

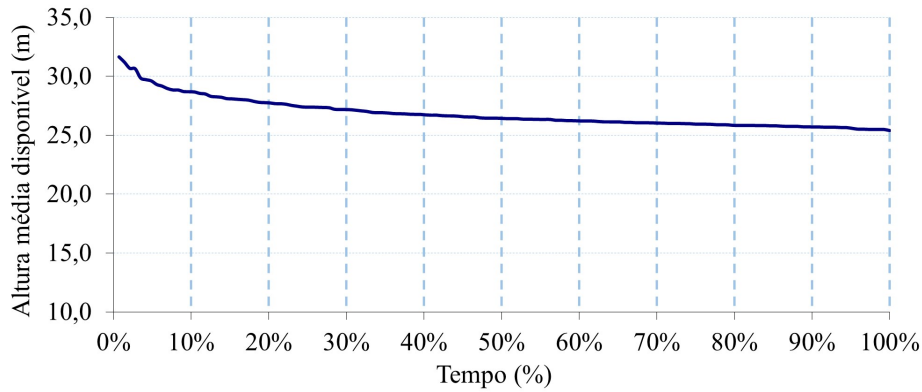


Figura 39 – Curva de permanência das alturas médias disponíveis da PCH Palmeiras
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

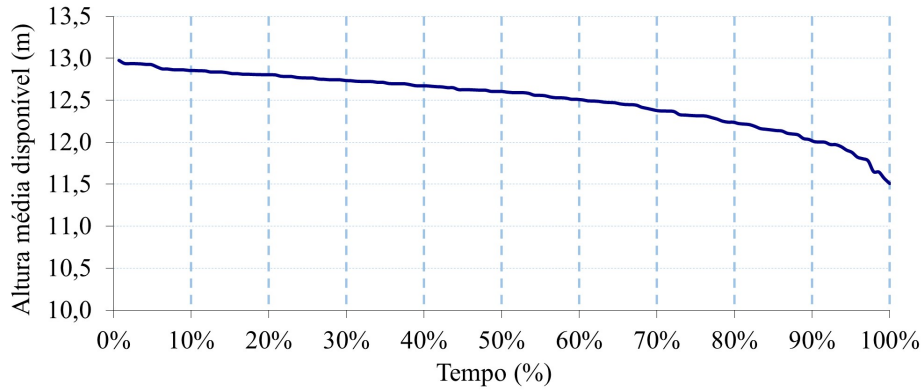


Figura 40 – Curva de permanência das alturas médias disponíveis da PCH Retiro
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

5.4.2 Cálculo das Perdas de Carga (h_{perdas})

Considerando os dados de perda de carga de ensaio das PCHs apresentados nas Tabelas 4, 5, 6 e 7 e aplicando o MMQ, conforme descrito na Subseção ??, foi determinada a constante de perda de carga w para cada PCH. Assim, as Equações (56), (57), (58) e (59) permitem calcular as perdas de carga das PCHs Dourados, São Joaquim, Palmeiras e Retiro, respectivamente.

$$h_{Perdas} = 3,0099 \times 10^{-5} \times Q_t^2 \quad (56)$$

$$h_{Perdas} = 3,1420 \times 10^{-4} \times Q_t^2 \quad (57)$$

$$h_{Perdas} = 3,0651 \times 10^{-5} \times Q_t^2 \quad (58)$$

$$h_{\text{Perdas}} = 3,0703 \times 10^{-5} \times Q_t^2 \quad (59)$$

5.4.3 Cálculo da altura líquida de queda (H_t)

A altura líquida de queda (H_t) considerada para o modelo é dado de acordo com as condições a seguir:

$$H_t = \begin{cases} 0, & \text{para } H < H_{\text{oper}}^{\min} \\ H - h_{\text{perdas}}, & \text{para } H_{\text{oper}}^{\min} \leq H \leq H_{\text{oper}}^{\max} \end{cases}$$

5.5 Caracterização e descrição das variáveis do estudo de caso: Funções Objetivo e restrições

□ Funções Objetivo:

- Maximizar o potencial de energia elétrica das PCHs em Cascata;
- Minimizar o custo de Operação e Manutenção (OM) das PCHs;
- Minimizar perdas de carga das PCHs;

□ Restrições:

- Restrições operacionais (limites de vazão (m^3/s) turbinada para operação; limites de altura (m) de queda d'água para operação);
- Restrições físicas dos equipamentos eletromecânicos (Restrição de eficiência da turbina e do gerador);
- Restrição de potência ativa (P) gerada no empreendimento (MW).

5.6 Parâmetros usados no NSGA II do modelo proposto

Um modelo de operação ótima multiobjetivo foi construído considerando a interação de três objetivos. As restrições de igualdade e desigualdade do sistema devem, entretanto, ser satisfeitas.

Neste trabalho, foi escolhido o algoritmo evolutivo NSGA II proposto por Deb et al. (2002) por trabalhar com vários objetivos, que podem ser alterados dependendo das condições que o problema apresentar. Além disso, o algoritmo é amplamente utilizado na solução da operação ótima multiobjetivo de usinas hidrelétricas (BOYAGHCHI; SOHBATLOO, 2018), (HUANG et al., 2019), (YU et al., 2021).

Usou-se o cruzamento de ponto único (*single-point crossover*) e a mutação de bit a bit para os AG codificados binários e o operador de cruzamento binário simulado (SBX) e mutação polinomial para os AG reais (DEB; AGARWAL, 1995) (NEBRO et al., 2013), (CARLES-BOU; GALÁN, 2023). Para este estudo de caso foi usado 500 como o tamanho da população, executando o Algoritmo durante 100 gerações. Para o operador de *crossover* SBX, foram usados índices de distribuição para cruzamento $\eta_c = 15$ e foram usados os índices de distribuição para mutação $\eta_m = 20$. A Probabilidade de cruzamento utilizada foi de $p_c = 0,9$ e a probabilidade de mutação $p_m = 0,04$. Herdando 10 descendentes.

5.7 Modelagem Matemática usando o NSGA II para o modelo proposto

O problema consiste em otimizar três objetivos ($M = 3$): A função $f_1(x)$ é maximizada e representa, o potencial de energia elétrica do empreendimento. As funções $f_2(x)$ e $f_3(x)$ são minimizadas representam, as perdas de carga do empreendimento e o custo de Operação e Manutenção (O&M) das PCHs.

A otimização está sujeita a dezoito restrições de desigualdade ($J = 18$), ou seja

$$\begin{aligned} 0,6 &\leq g_j(x) \leq 1 && \text{com } j = 1, 2, 3, \dots, J \\ P_{\min} &< g_j(x) \leq P_{\max} \leq 1 && \text{com } j = 1, 2, 3, \dots, J \\ 0,8 &\leq g_j(x) \leq 1 \leq 1 && \text{com } j = 1, 2, 3, \dots, J \end{aligned}$$

As restrições $g_1(x)$ e $g_2(x)$ estão relacionadas às eficiências mínima (0,6) e máxima (1,0) das turbinas durante a operação. As restrições $g_3(x)$ a $g_{10}(x)$ referem-se aos limites de potência mínima e máxima do empreendimento conforme definidos no projeto base submetido à ANEEL. Já as restrições $g_{11}(x)$ a $g_{18}(x)$ estão associadas aos limites de eficiência do gerador, que variam de acordo com a potência instantânea do empreendimento, respeitando o intervalo $0,8 \leq g_j(x) \leq 1$.

O problema contém quarenta e quatro restrições de igualdade, ou seja, ($K = 44$): $h_1(x)$, $h_2(x)$, $h_3(x)$, ..., $h_{44}(x)$ que estão relacionadas as constantes dos problemas, coeficientes do polinômio da Equação de eficiência turbina e do gerador, etc. O problema é definido em relação à duas variáveis ($N = 2$). Onde x_1 representa a vazão turbinada de operação das PCHs e x_2 representa a altura da queda líquida de operação das PCHs. Além disso o problema tem oito conjuntos de intervalos de interação, ($i = 8$), que correspondem aos limites operativos de vazão turbinada e altura de queda líquida. Esses intervalos são definidos por $x_1^{(L)} \leq x_{1,PCH} \leq x_1^{(U)}$ para vazão turbinada e $x_2^{(L)} \leq x_{2,PCH} \leq x_2^{(U)}$ para altura de queda líquida.

5.7.1 Formulação do problema de otimização multiobjetivo para cada PCH

As variáveis que determinam a estrutura e o estado do sistema incluem: a vazão de água que passa pelas turbinas, altura líquida para a operação. A variável de decisão do problema é a quantidade de água liberada pelos canais das turbinas em cada período de planejamento.

□ Maximizar o potencial de geração de Energia $f_1(x)$

$$Max f_1(x) = (a_{02}x_1^2 + a_{20}x_2^2 + a_{11}x_1x_2 + a_{01}x_1 + a_{10}x_2 + a_{00})\eta_g\rho gx_1x_2 \quad (60)$$

Onde,

x_1 é a vazão de operação instantânea;

x_2 é a altura da queda líquida de operação instantânea;

ρ é o massa específica da água;

g é a aceleração da gravidade;

$a_{00}, a_{10}, a_{01}, a_{11}, a_{20}, a_{02}, a_{30}, a_{21}, a_{12}, a_{03}$ são os coeficientes da função de eficiência da turbina das PCHs.

Para este estudo considerou $\rho = 1 \times 10^3 kg/m^3$ e $g = 9,8 m/s^2$. Ou seja,

$$h_1(x) = 1000 \quad (61)$$

$$h_2(x) = 9,8 \quad (62)$$

Aplicou-se o MMQ e obteve-se os parâmetros da Tabela 20 que representam os coeficientes da Equação (60).

Tabela 20 – Coeficientes da função de eficiência da turbina das PCHs

| $h_k(x)$ | Coeficientes | PCH Dourados | PCH São Joaquim | PCH Palmeiras | PCH Retiro |
|--------------|--------------|--------------|-----------------|---------------|-------------|
| $h_{3,i}(x)$ | a_{00} | 0,0212808 | -2,0922191 | -15,5337826 | -21,4012741 |
| $h_{4,i}(x)$ | a_{10} | 0,2460038 | 0,4614203 | 3,2259566 | 2,9449458 |
| $h_{5,i}(x)$ | a_{01} | -0,0295974 | -0,1165685 | -0,0103538 | 0,0754253 |
| $h_{6,i}(x)$ | a_{11} | 0,0024856 | 0,0095864 | -0,0001362 | -0,0049148 |
| $h_{7,i}(x)$ | a_{20} | -0,0091414 | -0,0182262 | -0,1487952 | -0,0974525 |
| $h_{8,i}(x)$ | a_{02} | -0,0001690 | -0,0012370 | 0,0000333 | -0,0000656 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Os parâmetros a_{02} e a_{20} indicam um comportamento de concavidade para baixo. À medida que a descarga aumenta combinada ao aumento da altura, a eficiência da turbina tem valores mais significativos atingindo um uma região máxima de eficiência.

□ Minimizar o custo de Operação e Manutenção (O&M) da PCH $f_2(x)$

$$\min f_2(x) = 0,025 \cdot k \left(\frac{1821,43 \cdot (f_1(x))^{0,5}}{x_2^{1,25}} \right)^n \quad (63)$$

Onde,

k e n são constantes empíricas que variam de acordo com as características do mercado regional.

Foi utilizado $k = 1567,2$ e $n = 0,1026$ de acordo com Tiago Filho, Santos e Barros (2017), ou seja,

$$h_{27}(x) = 1567,2 \quad (64)$$

$$h_{28}(x) = 0,1026 \quad (65)$$

□ Minimizar as perdas de carga $f_3(x)$

As perdas de carga em um sistema de PCHs em cascata representam um fator crítico na eficiência operacional, uma vez que influenciam diretamente a quantidade de energia hidráulica disponível para conversão em energia elétrica. A Equação 21 quantifica essas perdas, considerando a interação da vazão em cada PCH ao longo da cascata. Sendo a constante (w) de perda de carga obtida pelo MMQ a partir dos dados de ensaio de Perda de carga das Tabelas 4, 5, 6 e 7

$$\min f_3(x) = w \times x_1^2 \quad (66)$$

Tabela 21 – Constantes de perda de carga (w) para diferentes PCHs

| PCH | $h_k(x)$ | (w) |
|-------------|-------------|-------------------------|
| Dourados | $h_{29}(x)$ | $3,0099 \times 10^{-5}$ |
| São Joaquim | $h_{30}(x)$ | $3,1400 \times 10^{-4}$ |
| Palmeiras | $h_{31}(x)$ | $3,0651 \times 10^{-5}$ |
| Retiro | $h_{32}(x)$ | $3,0703 \times 10^{-5}$ |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

5.7.1.1 Outras condições de restrição

□ Restrição de limites de vazão (m^3/s) turbinada para operação:

As turbinas Francis podem operar com vazões a partir de 40% da vazão máxima turbinada. Para a turbina Francis da PCH Dourados, cuja vazão máxima turbinada é de $44,00 \text{ m}^3/s$, considerou-se uma vazão mínima turbinada de $18,02 \text{ m}^3/s$. A operação abaixo desse valor pode levar à cavitação, perda de eficiência e danos ao equipamento. Para as turbinas do tipo Kaplan da PCH São Joaquim considerou-se que ela pode operar

com vazões de 30% da vazão máxima turbinada, devido à sua maior flexibilidade em comparação com as Francis. Para a turbina Kaplan da PCH São Joaquim, com vazão máxima turbinada de $18,33 \text{ m}^3/\text{s}$ para cada unidade geradora, o mínimo considerado foi de $5,33 \text{ m}^3/\text{s}$. Para as turbinas do tipo Bulbo das PCHs Retiro e Palmeiras foi considerado uma vazão mínima turbinada de 21% da vazão máxima, ou seja $32,45 \text{ m}^3/\text{s}$.

O conjunto de restrições apresentada pelas Equações (67) a (70) possuem limites superior e inferior devido a capacidade de engolimento máximo e mínimo das turbinas, que são definidos de acordo com a Tabela 22. A PCH São Joaquim possui três unidades geradoras. Nesse caso, o intervalo representa as vazões máxima e mínima de operação para cada uma das três unidades geradoras de energia.

Tabela 22 – Limites operacionais de vazão por unidades geradoras

| PCH | Vazão Mínima (m^3/s) $x_1^{(L)}$ | Vazão Máxima (m^3/s) $x_1^{(U)}$ |
|-------------|--|--|
| Dourados | 18,02 | 44,00 |
| São Joaquim | 5,33 | 18,33 |
| Palmeiras | 32,45 | 154,50 |
| Retiro | 32,45 | 154,50 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

$$18,02 \leq x_{1,\text{Dourados}} \leq 44,00 \quad (67)$$

$$5,33 \leq x_{1,\text{São Joaquim}} \leq 18,33 \quad (68)$$

$$32,45 \leq x_{1,\text{Palmeiras}} \leq 154,50 \quad (69)$$

$$32,45 \leq x_{1,\text{Retiro}} \leq 154,50 \quad (70)$$

□ Restrição de limites de altura (m) de queda d'água para operação:

O conjunto de restrições das Equações de (71) a (74) possuem limites superior e inferior devido à estrutura física de cada barragem e às variáveis: queda mínima e queda máxima, em metros(m), definidos de acordo com a Tabela 23. A PCH São Joaquim possui três turbinas. Nesse caso, o intervalo representa as alturas máxima e mínima de operação para cada uma das 3 unidades geradoras de energia.

Tabela 23 – Limites operacionais de altura por unidades geradoras

| PCH | Queda Mínima (m) $x_2^{(L)}$ | Queda Máxima (m) $x_2^{(U)}$ |
|-------------|--|--|
| Dourados | 28,23 | 31,34 |
| São Joaquim | 13,67 | 17,16 |
| Palmeiras | 9,58 | 13,31 |
| Retiro | 10,29 | 13,26 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

$$28,33 \leq x_{2,\text{Dourados}} \leq 31,34 \quad (71)$$

$$13,67 \leq x_{2,\text{São Joaquim}} \leq 17,16 \quad (72)$$

$$9,58 \leq x_{2,\text{Palmeiras}} \leq 13,31 \quad (73)$$

$$10,29 \leq x_{2,\text{Retiro}} \leq 13,26 \quad (74)$$

□ Restrição de eficiência da turbina: $0,6 \leq g_j(x) \leq 1$

$$g_1(x) \geq 0,6 \quad (75)$$

$$g_2(x) \leq 1 \quad (76)$$

Sendo a Eficiência da turbina definida pela Equação (15) ou (16).

□ Restrição de potência ativa (P) gerada no empreendimento (MW): $P_{\min} < g_j(x) \leq P_{\max}$
A potência gerada (P_{PCH}) em cada empreendimento é dado pela Equação (77):

$$P_{PCH} = f_1(x) \quad (77)$$

Tabela 24 – Limites de potência do empreendimento

| PCH | P_{\min} (MW) | P_{\max} (MW) |
|-------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Dourados | 2,3 | 10,80 |
| São Joaquim | 1,7 | 8,05 |
| Palmeiras | 3,6 | 16,50 |
| Retiro | 3,5 | 16,00 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

As restrições de potência, para este estudo, estão descritas nas Equações (78) a (85).

$$g_3(x) = P_{\text{Dourados}} > 2,3 \quad (78)$$

$$g_4(x) = P_{\text{Dourados}} \leq 10,80 \quad (79)$$

$$g_5(x) = P_{\text{São Joaquim}} > 1,7 \quad (80)$$

$$g_6(x) = P_{\text{São Joaquim}} \geq 8,05 \quad (81)$$

$$g_7(x) = P_{\text{Palmeiras}} > 3,6 \quad (82)$$

$$g_8(x) = P_{\text{Palmeiras}} \leq 16,50 \quad (83)$$

$$g_9(x) = P_{\text{Retiro}} > 3,5 \quad (84)$$

$$g_{10}(x) = P_{\text{Retiro}} \leq 16,00 \quad (85)$$

□ Restrição de eficiência do gerador: $0,8 \leq g_j(x) \leq 1$

Seja o rendimento do gerador $\eta_g(P)$ dado pela Equação (17), onde a , b , e c são coeficientes da função apresentados na Tabela 25. Os coeficientes foram obtidos pelo MMQ a partir dos dados de ensaio de Potência gerada apresentados nas Tabelas 4, 5, 6 e 7.

Tabela 25 – Coeficientes das funções de eficiência dos geradores das PCH em estudo

| $h_{k,i}(x)$ | Coeficientes | PCH Dourados | PCH São Joaquim | PCH Palmeiras | PCH Retiro |
|--------------|--------------|---------------|-----------------|---------------|------------|
| $h_{k,i}(x)$ | a | 0,9350 | 0,9593 | 0,9076 | 0,8869 |
| $h_{k,i}(x)$ | b | 0,0038 | 0,0030 | 0,0109 | 0,0173 |
| $h_{k,i}(x)$ | c | -1,317859e-05 | 0,0005 | -0,00045 | -0,0012 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O coeficiente a (constante) determina o valor mínimo de eficiência do gerador. Esse valor base, relativamente alto (próximo de 1) indica que mesmo em baixas potências, o gerador apresentará uma eficiência significativa. Essa é uma característica desejável para casos de PCH que trabalha com baixas demandas. O coeficiente b , indica a taxa de mudança da função em relação a P . O coeficiente c negativo indica a concavidade para baixo.

As restrições de eficiência do gerador, para este estudo, estão descritas nas Equações (86) a (93):

$$g_{11}(x) = \eta_g(P_{\text{Dourados}}) = 0,9350 + 0,0038P - 1,31785 \times 10^{-5}P^2 \geq 0,8 \quad (86)$$

$$g_{12}(x) = \eta_g(P_{\text{Dourados}}) = 0,9350 + 0,0038P - 1,31785 \times 10^{-5}P^2 \leq 1 \quad (87)$$

$$g_{13}(x) = \eta_g(P_{\text{São Joaquim}}) = 0,9593 + 0,0030P + 0,0030P^2 \geq 0,8 \quad (88)$$

$$g_{14}(x) = \eta_g(P_{\text{São Joaquim}}) = 0,9593 + 0,0030P + 0,0030P^2 \leq 1 \quad (89)$$

$$g_{15}(x) = \eta_g(P_{\text{Palmeiras}}) = 0,9076 + 0,0109P - 0,00045P^2 \geq 0,8 \quad (90)$$

$$g_{16}(x) = \eta_g(P_{\text{Palmeiras}}) = 0,9076 + 0,0109P - 0,00045P^2 \leq 1 \quad (91)$$

$$g_{17}(x) = \eta_g(P_{\text{Retiro}}) = 0,8869 + 0,0173P - 0,0012P^2 \geq 0,8 \quad (92)$$

$$g_{18}(x) = \eta_g(P_{\text{Retiro}}) = 0,8869 + 0,0173P - 0,0012P^2 \leq 1 \quad (93)$$

5.7.2 Formulação do problema de otimização multiobjetivo para as PCHs em cascata

Na otimização em cascata, consideram-se a maximização da potência total do sistema, a minimização do custo médio de operação e a minimização das perdas médias de carga.

O Potencial total (P_{total}) na geração de energia é dado pela Equação (94).

$$P_{\text{total}} = \max \sum_{i=1}^n \eta_{t,i} \eta_{g,i} \rho g Q_{t,i} H_{t,i} \quad (94)$$

O custo médio de Operação e Manutenção ($\bar{C}_{O\&M}$) em [\$/kW] é minimizado do sistema é minimizado pela Equação (95).

$$\bar{C}_{O\&M} [\$/\text{MW}] = \min \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 0,025 \cdot k \left(\frac{1821,43 P_i^{0,5}}{H_{t,i}^{1,25}} \right)^m \right) \quad (95)$$

A perda de carga média do sistema (\bar{h}_{Perdas}) é dada pela Equação (96):

$$\bar{h}_{\text{Perdas}} = \min \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (w_i \times Q_{t,i}^2) \right) \quad (96)$$

Sujeito a:

$$Q_{\text{turb},i}^{\min} \leq Q_{t,i} < Q_{\text{turb},i}^{\max}, \quad \text{com } i = 1, 2, \dots, n \quad (97)$$

$$H_{\text{turb}}^{\min} \leq H_{t,i} < H_{\text{turb}}^{\max}, \quad \text{com } i = 1, 2, \dots, n \quad (98)$$

$$0.8 \leq \eta_{g,i} \leq 1, \quad \text{com } i = 1, 2, \dots, n \quad (99)$$

$$0.6 \leq \eta_{t,i} \leq 1, \quad \text{com } i = 1, 2, \dots, n \quad (100)$$

$$P_{\text{total}}^{\max} < P_{\text{total}} < P_{\text{total}}^{\max} \quad (101)$$

5.8 Escolha das melhores soluções pelo Método das Ponderações (*Weighted Sum Method*)

Após a execução do modelo multiobjetivo e a obtenção das melhores soluções do conjunto de Pareto, atribuíram-se pesos aos objetivos, que foram então combinados em uma única função escalar, conforme apresentado na Equação (102)(JUNIOR, 2014).

$$F = w_1 f_1 + w_2 f_2 + \dots + w_n f_n \quad (102)$$

Onde,

w_i são os pesos e

f_i são as funções objetivo.

Como a potência gerada está diretamente relacionada à geração de energia elétrica, atribuiu-se a ela um peso de 0,6. Para o objetivo de custo de operação e manutenção, foi atribuído um peso de 0,3 e para o objetivo de perdas de carga, um peso de 0,1. Aplicar esses pesos depois da execução do modelo permite escolher uma solução específica do conjunto Pareto. Outros cenários podem ser analisados.

Experimentos e Análise dos Resultados

Este capítulo apresenta os principais resultados do estudo, que incluem as curvas de eficiência do gerador e da turbina derivadas das funções obtidas. Além disso, é realizada uma análise estatística do modelo de regressão aplicado às funções eficiências das turbinas das PCHs estudadas. Destaca como os testes estatísticos podem validar a metodologia desse estudo, tornando uma ferramenta para otimização na geração de energia. Por fim, são apresentados os principais resultados obtidos pelo algoritmo NSGA II no estudo de caso.

6.1 Curva de Eficiência do gerador em função da potência do empreendimento

A Figura 41 apresenta a curva de rendimento (eficiência) do gerador da PCH de Dourados em função da potência do empreendimento, que varia de, em média, 2 MW a 11 MW. A eficiência do gerador é representada no eixo vertical, com valores entre 0,945 e 0,975 (ou 94,5% a 97,5%). O rendimento do gerador aumenta à medida que a potência gerada do empreendimento aumenta, mas com uma curva suave e quase linear. Isso indica que o gerador opera de forma eficiente em toda a faixa de potência em que o empreendimento foi projetado, mas com um aumento gradual no rendimento à medida que a carga aumenta.

A Figura 42 apresenta a curva de eficiência do gerador da PCH São Joaquim, destacando a relação entre a potência do empreendimento e a eficiência do gerador. A curva abrange um intervalo de potência de 0,6 MW a 2,78 MW, e, nesse intervalo, observam-se pequenas variações na eficiência, com um aumento de apenas 0,01 (ou 1%) ao longo de toda a faixa de operação. A eficiência do gerador varia pouco ao longo de toda a faixa de potência, o que indica que o gerador opera de forma altamente eficiente em diferentes cargas. Isso sugere que o gerador foi projetado para manter um desempenho estável, independentemente da demanda de potência.

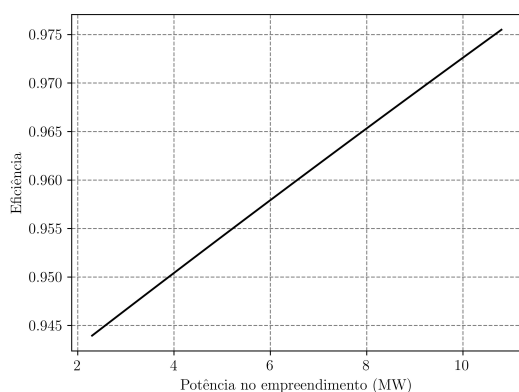


Figura 41 – Relação de Eficiência do Gerador: Potência vs Eficiência PCH Dourados

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

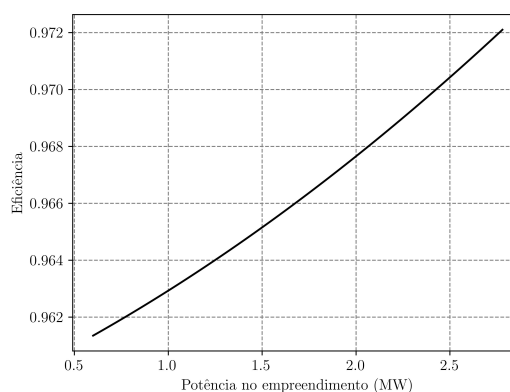


Figura 42 – Relação de Eficiência do Gerador: Potência vs Eficiência PCH São Joaquim

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 43 apresenta a curva de eficiência do gerador da PCH Palmeiras. Observa-se que o rendimento máximo do gerador ocorre quando a potência do empreendimento atinge aproximadamente 12 MW. Inicialmente, a curva apresenta um comportamento linear, com a eficiência aumentando conforme a potência do empreendimento aumenta.

A Figura 44 mostra a curva de eficiência do gerador da PCH Retiro. O aumento da potência no empreendimento inicialmente, reflete um impacto significativo na eficiência, atingindo um ponto máximo mas em seguida o efeito positivo diminui acarretando também, na diminuição da eficiência. Observa-se pela curva que os melhores rendimentos do gerador são obtidos quando o sistema gera uma potência entre 6 e 8 MW. A função apresentou um ponto crítico, ou ponto de máximo, com potência igual a 7,14 MW, nesse ponto a eficiência do gerador foi de 0,94. A partir desse ponto a curva apresenta uma inflexão, com a redução no rendimento a partir de obtenção de maiores potências. Vale ressaltar que a turbina e o gerador são elementos hidromecânicos que estão acoplados e devem ser analisados de maneira coordenada. Neste caso pode-se obter um valor de eficiência do conjunto, fazendo o produto das eficiências individuais.

6.2 Curva colina das turbinas das PCHs em estudo

A partir da obtenção da função de eficiência das turbinas de cada PCH, foram plotadas figuras que relacionam a eficiência da turbina com as curvas colina. As Figuras 45 e 46 apresentam as curvas colina da PCH Dourados. Para vazões a partir de $25 \text{ m}^3/\text{s}$, é importante que o operador considere alturas de queda maiores que 26 m . Já para vazões superiores a $40 \text{ m}^3/\text{s}$, o operador deve priorizar alturas de queda maiores que 28 m , a fim de garantir uma operação eficiente e otimizada da PCH. Essas condições operacionais destacam a importância de ajustar a altura de queda conforme a vazão, assegurando que

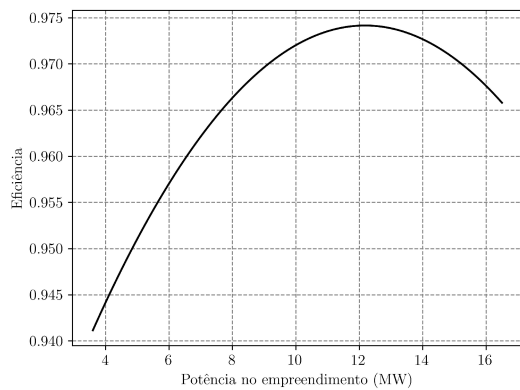


Figura 43 – Relação de Eficiência do Gerador: Potência vs Eficiência PCH Palmeiras

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

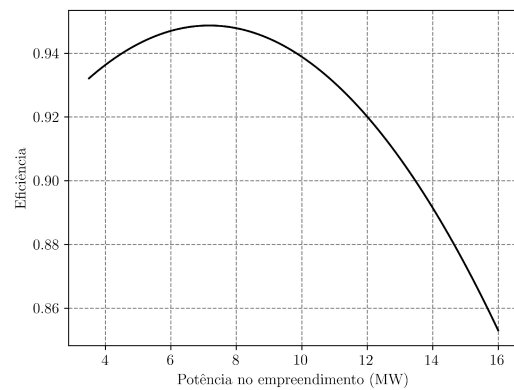


Figura 44 – Relação de Eficiência do Gerador: Potência vs Eficiência PCH Retiro

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

a PCH opere sempre dentro de sua faixa de máxima eficiência.

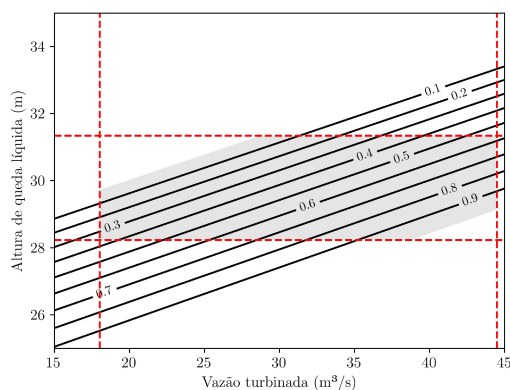


Figura 45 – Relação de Eficiência turbina: Vazão turbinada vs Altura de Queda líquida da PCH Dourados

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

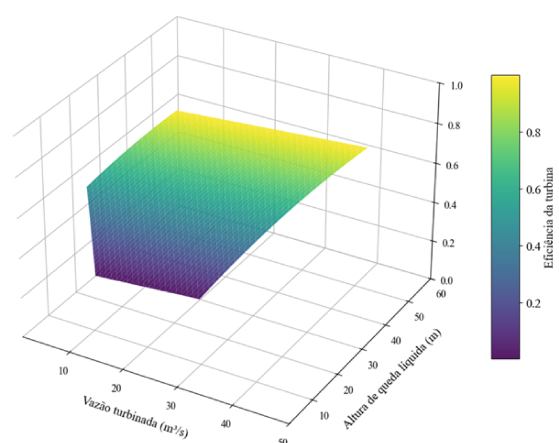


Figura 46 – Curva Colina da Turbina da PCH Dourados

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

As Figuras 47 e 48 apresentam a curva colina da PCH São Joaquim. Observa-se, por meio da curva, que a PCH apresenta boas eficiências para diferentes combinações de altura de queda e vazão. A eficiência da PCH pode estar relacionada ao fato de ela ser construída com dutos forçados e desvio do rio, uma configuração que permite operar com pequenas vazões distribuídas nos diferentes dutos. Esse tipo de configuração é relativamente mais fácil de controlar em comparação com outras PCHs a fio d'água, que são instaladas diretamente no leito do rio, como as PCHs Palmeiras e Retiro por exemplo.

A Figura 31 apresenta a curva de permanência de vazões da PCH Dourados e São Joaquim. Em 86% do tempo há uma oportunidade de obter pelo menos $52 \text{ m}^3/\text{s}$ da vazão. Essa condição oferece uma excelente oportunidade para a geração de energia

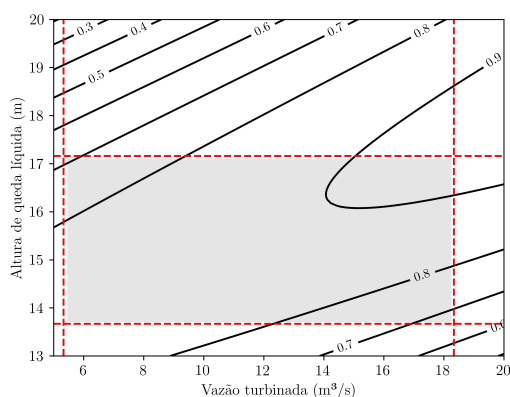


Figura 47 – Relação de Eficiência turbina:
Vazão turbinada vs Altura de
Queda líquida da PCH São Jo-
aquim

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

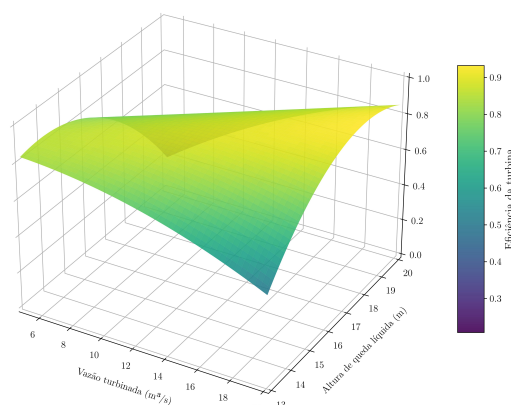


Figura 48 – Curva Colina da Turbina da
PCH São Joaquim

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

elétrica, permitindo que os operadores alcancem a eficiência máxima dentro das possibilidades operacionais dessas PCHs. Dessa forma, é possível otimizar a produção de energia, assegurando que as PCHs operem de maneira eficiente e sustentável.

Considerando a curva de permanência de alturas disponível da PCH Dourados, apresentada na Figura 37, observa-se que, em mais de 80% do tempo, a altura disponível está, em média, em 30 m, e nos outros 10% do tempo, supera os 26 m. Isso garante que, na maior parte do tempo, os operadores podem considerar que a faixa de altura operacional estará assegurada.

Analisando a Figura 38, observa-se que a curva de permanência da altura média disponível indica que, por mais de 90% do tempo, há uma altura disponível de aproximadamente 20 m, ou seja, maior que a altura máxima operacional. Dessa forma, o modelo de otimização conseguirá identificar as melhores soluções de altura dentro da faixa de operação de maneira mais assertiva.

A Figura 49 e a Figura 50 apresentam a curva colina e sua correspondente representação tridimensional da turbina da PCH Palmeiras. Observa-se que, para vazões menores, é importante que a PCH garanta quedas líquidas mais altas. A partir de $80 \text{ m}^3/\text{s}$, é possível reduzir gradativamente a altura de queda e ainda manter uma eficiência relativamente boa.

A Figura 51 apresenta a curva-colina da turbina da PCH de Retiro. A região hachurada representa a faixa de operação da usina que corresponde ao intervalo de $10,29 \text{ m}$ a $13,26 \text{ m}$ de queda d'água e de $35,5 \text{ m}^3/\text{s}$ a $154,50 \text{ m}^3/\text{s}$ de vazão turbinada (é recomendável que a turbina opere com vazão turbinada de pelo menos 21% da vazão máxima turbinada, tendo em vista que valores menores podem causar instabilidade na operação e danos físicos à turbina). A Figura 52 apresenta a curva tridimensional de eficiência, com a superfície de operação da turbina da PCH Retiro. Neste caso, para a altura máxima de

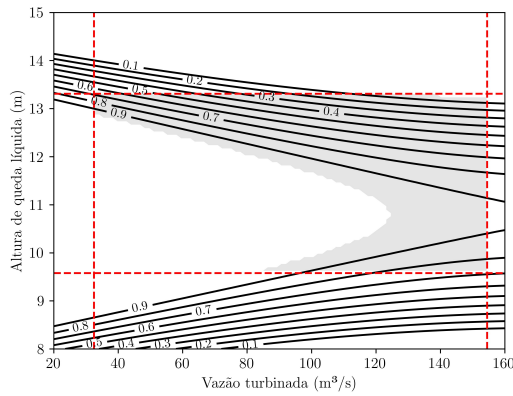


Figura 49 – Relação de Eficiência turbina:
Vazão turbinada vs Altura de
Queda líquida da PCH Pal-
meiras

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

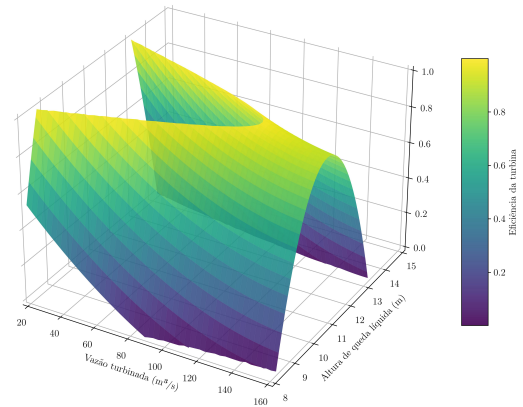


Figura 50 – Curva Colina da Turbina da
PCH Palmeiras

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

operação, a combinação para que a turbina tenha um melhor rendimento seria com a disponibilidade de vazão de, em média, $70 \text{ m}^3/\text{s}$. Para a altura mínima de operação, os melhores rendimentos serão obtidos com valores de vazão turbinada, de aproximadamente, $120 \text{ m}^3/\text{s}$. A superfície hachurada da curva é a região de operação da PCH Retiro.

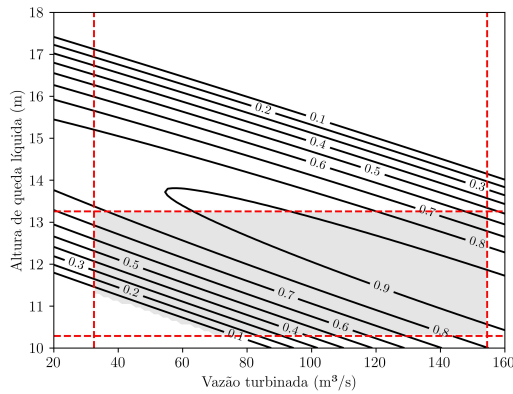


Figura 51 – Relação de Eficiência turbina:
Vazão turbinada vs Altura de
Queda líquida da PCH Retiro

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

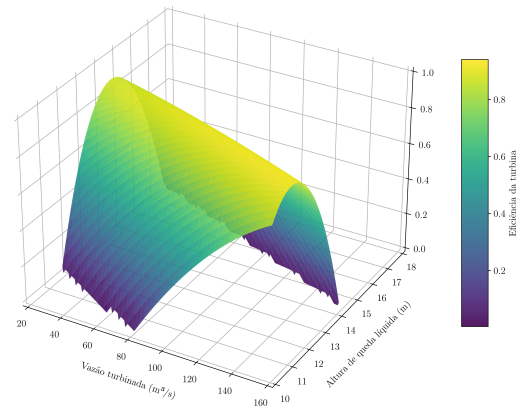


Figura 52 – Curva Colina da Turbina da
PCH Retiro

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 32 apresenta as vazões de permanência dos empreendimentos das PCHs Palmeiras e Retiro. Em aproximadamente 88% do tempo, a vazão é de $33,00 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto cerca de 10% do tempo a vazão atinge um mínimo de $156,00 \text{ m}^3/\text{s}$. Isso indica uma grande oportunidade para operação com vazões menores, mas poucas oportunidades para vazões mais elevadas. Além disso, em cerca de 50% do tempo, a vazão registrada é de $65 \text{ m}^3/\text{s}$. Considerando que o intervalo de vazão operacional da PCH varia de 32,50

m^3/s e $155,50 m^3/s$, os operadores devem adotar estratégias que permitam a melhor combinação de vazão e altura de queda, a fim de maximizar a eficiência energética.

A curva de permanência de alturas disponíveis da PCH Palmeiras, apresentada na Figura 39, reforça que, em mais de 15% do tempo, há uma altura disponível superior a 28 m, enquanto nos outros 85% do tempo, a altura ultrapassa o limite de 25 m, permanecendo dentro da faixa operacional. Isso representa um excelente indicador para a otimização, permitindo a melhor combinação entre altura e vazão no modelo de otimização. A curva de permanência de altura disponível da PCH Retiro, Figura 40, mostra que, em 50% do tempo, a altura disponível ultrapassa 12,5 m. Em 20% do tempo, a altura disponível varia entre 12,3 m e 12,5 m, enquanto nos 30% restantes, a altura se mantém-se na faixa de 11,3 m a 12,3 m.

6.2.1 Análise Estatística do Modelo de Regressão para as funções de Eficiência das Turbinas das PCHs estudadas

Os erros padrão dos coeficientes da função de Eficiência da turbina da PCH de Dourados foram muito altos. A Estatística F da função da curva de eficiência da turbinada da PCH Dourados apresentou um valor muito alto, cerca de $4,320 \times 10^8$ associado a um valor-p de $1,18 \times 10^{-52}$, o que indicam que o modelo como um todo é estatisticamente significativo. No entanto, isso pode indicar um problemas nessa função em específico. O Teste de *Omnibus* resultou em um valor de 2,484 com $p = 0,289$, indicando que não há evidências estatísticas suficientes para rejeitar a normalidade dos resíduos. O Teste de *Jarque-Bera* no valor de 1,096 associado ao valor de $p = 0,578$, confirma que os resíduos seguem uma distribuição normal. O teste de *Skewness* (Assimetria) apresentou um valor de 0,009 indica que os resíduos estão simetricamente distribuídos. A *Kurtosis* (Curtose) de 1,791 indica que os resíduos têm uma distribuição com caudas mais leves do que uma distribuição normal. O teste de *Durbin-Watson* de 0,001 sugere que há autocorrelação positiva significativa nos resíduos, pois o valor está muito longe de 2. De modo geral, a função representa bem a maior parte dos dados estudados, mas não se ajusta adequadamente a alguns deles.

Os resultados apresentados na Tabela 26 indicam baixa evidência de ocorrência de valores extremos. A maioria dos coeficientes da função de eficiência da PCH São Joaquim apresentou valores de valor-p superiores a 0,05, sugerindo que as médias podem não ser estatisticamente diferentes. O teste t retornou valores próximos de zero, reforçando essa hipótese. Além disso, os coeficientes da função de eficiência da PCH São Joaquim demonstram bom desempenho na predição dos dados, uma vez que, em sua maioria, os erros padrão observados foram pequenos.

De acordo com a Tabela 27 o modelo da função de eficiência da turbina da PCH de São Joaquim apresentou um R-quadrado (R^2) de 0,999 o que indica que o modelo explica

muito bem a variância da variável dependente. O valor da Estatística F obtido é muito alto ($7,195 \times 10^4$) com um valor-p associado muito pequeno de $2,17 \times 10^{-28}$, o que pode indicar que o modelo é estatisticamente significativo. Isso significa que pelo menos uma das variáveis independentes, seja vazão ou altura, tem um efeito significativo sobre a variável dependente. É possível que essa variável seja a vazão, pois ela é mais fácil de controlar operacionalmente em comparação à altura de queda. O valor de 19,224 do Teste de *Omnibus* com $p = 0,000$, pode indicar uma forte evidência de não normalidade dos resíduos. O valor de 25,994 do Teste de *Jarque-Bera*, com $p = 2,27 \times 10^{-6}$, pode reforçar a não normalidade dos resíduos. A *Skewness* (Assimetria) de 1,62 indica que os resíduos estão assimetricamente distribuídos, com uma cauda mais longa à esquerda. A *Kurtosis* (Curtose) de 7,727 indica que os resíduos têm uma distribuição com caudas mais pesadas do que uma distribuição normal. Já o teste de *Durbin-Watson* de 1,915 sugere que não há autocorrelação significativa nos resíduos, pois o valor está próximo de 2.

Tabela 26 – Testes estatísticos da função de eficiência da PCH São Joaquim

| | Coeficiente | Erro Padrão | Teste t | Valor-p | Intervalo de Confiança (95%) | |
|-----------|-------------|-------------|---------|---------|------------------------------|----------|
| | | | | | Inferior | Superior |
| constante | -2,0922 | 3,769 | -0,555 | 0,588 | -10,234 | 6,050 |
| x_1 | 0,4614 | 0,625 | 0,739 | 0,473 | -0,888 | 1,811 |
| x_2 | -0,1166 | 0,172 | -0,679 | 0,509 | -0,487 | 0,254 |
| x_3 | -0,0182 | 0,026 | -0,704 | 0,494 | -0,074 | 0,038 |
| x_4 | -0,0012 | 0,002 | -0,638 | 0,535 | -0,005 | 0,003 |
| x_5 | 0,0096 | 0,014 | 0,675 | 0,511 | -0,021 | 0,04 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 27 – Resultados de testes estatísticos para validação da equação de eficiência da turbina da PCH São Joaquim

| Estatística | Valor |
|----------------------|------------------------|
| R^2 | 0,999 |
| R^2 Ajustado | 0,999 |
| Estatística F | $7,195 \times 10^4$ |
| Prob (Estatística F) | $2,17 \times 10^{-28}$ |
| Omnibus | 19,224 |
| Prob (Omnibus) | 0,000 |
| Assimetria | 1,620 |
| Curtose | 7,727 |
| Durbin-Watson (DW) | 1,915 |
| Jarque-Bera (JB) | 25,994 |
| Prob (JB) | $2,27 \times 10^{-6}$ |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 53 apresenta o histograma de resíduos para a função de eficiência da PCH São Joaquim. Observa-se que a frequência dos resíduos estão mais concentradas entre

-0,0002 e 0,0000. O que reforça o valor de 1,62 obtido no teste de *Skewness* (Assimetria) e indica uma assimetricamente distribuída à esquerda.

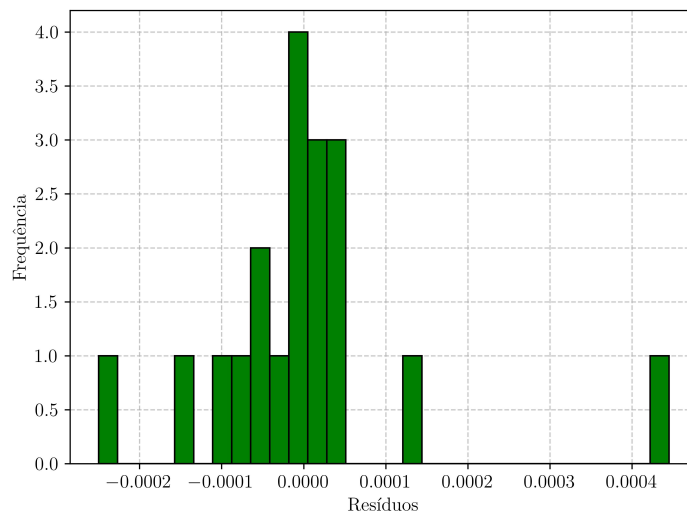


Figura 53 – Histograma de Resíduos (PCH São Joaquim)
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 54 apresenta o gráfico de quartis teóricos e quartis amostrais. De modo geral os quantis apresentam um comportamento com poucos desvios de normalidade. Os quartis mais extremos se dispersaram um pouco dos quartis teóricos

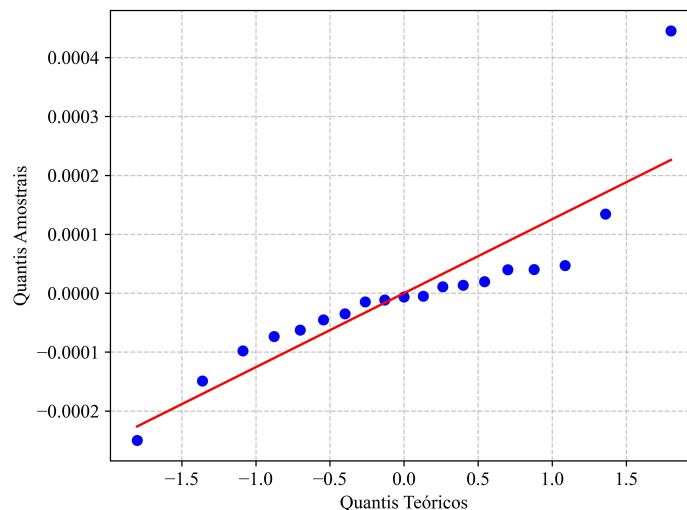


Figura 54 – Gráfico Q-Q Resíduos (PCH São Joaquim)
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 55 apresenta a relação dos resíduos e seus valores ajustados. Inicialmente os resíduos não se desviaram muito de 0. O desvio ocorreu, em sua maioria, na ordem de 0,0001. Quatro pontos em especial apresentaram desvios mais evidentes em relação aos valores ajustados, sendo o maior desvio na ordem de 0,0004.

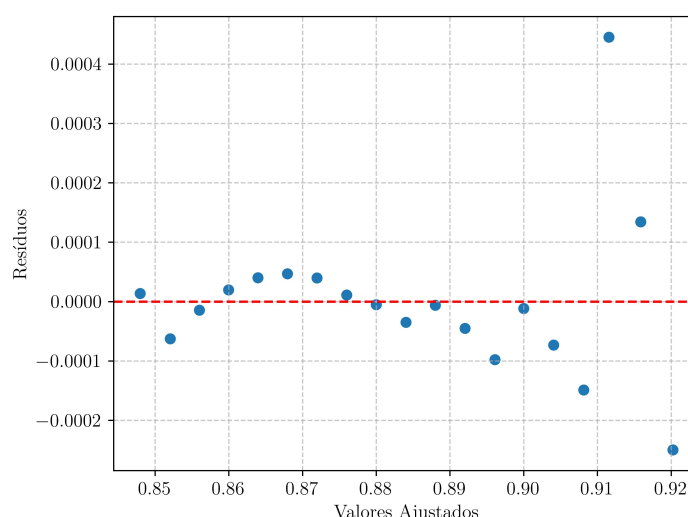


Figura 55 – Resíduos vs Valores Ajustados (PCH São Joaquim)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

As Tabelas 28 e 29 apresentam os dados da modelagem da função de eficiência da turbina hidráulica, da PCH Palmeiras utilizando regressão pelo MMQ. O modelo ajustado possui um valor de R^2 de 0,993, o que indica que 99,3% da variabilidade da variável dependente é explicada pelas variáveis independentes no modelo. Considera-se um resultado positivo, sugerindo que o modelo consegue descrever bem o comportamento de eficiência da turbina.

No entanto, ao considerar o R ajustado de 0,991, que leva em conta a penalização pelo número de variáveis explicativas, é possível perceber que o modelo ainda é robusto, embora tenha uma leve redução no poder explicativo devido ao número de variáveis incluídas. A estatística F do modelo foi de 364,4, com um valor de p de $1,14 \times 10^{-12}$, indicando que o modelo global é estatisticamente significativo. Isso sugere que as variáveis independentes, em conjunto, têm um impacto relevante na variável dependente e que a relação entre elas não é aleatória.

O teste *Durbin-Watson* apresentou um valor de 1,905, o que sugere que os resíduos não apresentam autocorrelação significativa. Isso é um bom sinal, pois indica que os erros do modelo são independentes, uma das suposições fundamentais para que os resultados da regressão sejam válidos. Em relação à normalidade dos resíduos, o teste de *Omnibus* forneceu um valor de 18,841 com $p = 0,0$, o que sugere forte evidência contra a hipótese de normalidade dos resíduos. No entanto, o teste de *Jarque-Bera*, com $p = 3,58 \times 10^{-5}$, também indica rejeição da hipótese de normalidade, embora a magnitude do valor de p sugira que os resíduos podem se desviar apenas levemente de uma distribuição normal. Portanto, embora haja evidências contra a normalidade, os resíduos podem ser considerados aproximadamente normais para fins práticos.

Os gráficos apresentados nas Figuras 56, 57 e 58 mostram, respectivamente, o histograma dos resíduos, o gráfico de quartis dos resíduos e a relação entre os valores ajustados

Tabela 28 – Testes estatísticos da função de eficiência da PCH Palmeiras

| | Coeficiente | Erro Padrão | Teste t | Valor-P | Intervalo de Confiança (95%) | |
|-----------|-----------------------|-----------------------|---------|---------|------------------------------|-----------------------|
| | | | | | Inferior | Superior |
| Constante | -15,5338 | 4,340 | -3,579 | 0,004 | -24,991 | -6,077 |
| x_1 | 3,2260 | 0,824 | 3,917 | 0,002 | 1,432 | 5,020 |
| x_2 | -0,0104 | 0,018 | -0,587 | 0,568 | -0,049 | 0,028 |
| x_3 | -0,1488 | 0,038 | -3,910 | 0,002 | -0,232 | -0,066 |
| x_4 | $3,34 \times 10^{-5}$ | $2,51 \times 10^{-5}$ | 1,331 | 0,208 | $-2,12 \times 10^{-5}$ | $8,79 \times 10^{-5}$ |
| x_5 | -0,0001 | 0,001 | -0,128 | 0,900 | -0,002 | 0,002 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Tabela 29 – Resultados de testes estatísticos para validação da equação de eficiência da turbina da PCH Palmeiras

| Estatística | Valor |
|----------------------|------------------------|
| R^2 | 0,993 |
| R^2 Ajustado | 0,991 |
| Estatística F | 364,4 |
| Prob (Estatística F) | $1,14 \times 10^{-12}$ |
| Omnibus | 18,841 |
| Prob (Omnibus) | 0,000 |
| Assimetria | -1,817 |
| Curtose | 6,755 |
| Durbin-Watson (DW) | 1,905 |
| Jarque-Bera (JB) | 20,476 |
| Prob (JB) | $3,58 \times 10^{-5}$ |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

e os resíduos, para os coeficientes da função de eficiência da turbina da PCH Palmeiras.

Na Figura 56, observa-se uma distribuição dos resíduos frequentemente concentrado em 0,000 o que pode sugerir que o modelo não apresenta um viés significativo (ou seja, os erros estão distribuídos de maneira simétrica ao redor da previsão). De modo geral o histograma indica que o modelo ajustado apresenta resíduos pequenos e distribuídos de forma relativamente uniforme ao redor de -0,004 e 0,004. Isso é um bom indicativo de que o modelo está capturando bem os padrões dos dados.

Os resultados do gráfico da Figura 57 sugerem que o modelo ajustado apresenta resíduos bem-comportados, sem grandes desvios da normalidade. Nos quartis extremos apresentam alguns pontos afastados, isso pode indicar leves desvios de normalidades. Em geral, esse afastamentos não comprometem a análise. Os pontos estão mais concentrados na região central. Este gráfico sugere que os resíduos do modelo seguem aproximadamente uma distribuição normal, com leves desvios nas extremidades.

O gráfico da Figura 58 mostra os resíduos em função dos valores ajustados do modelo. Geralmente esse tipo de gráfico é usado para verificar padrões sistemáticos nos resíduos,

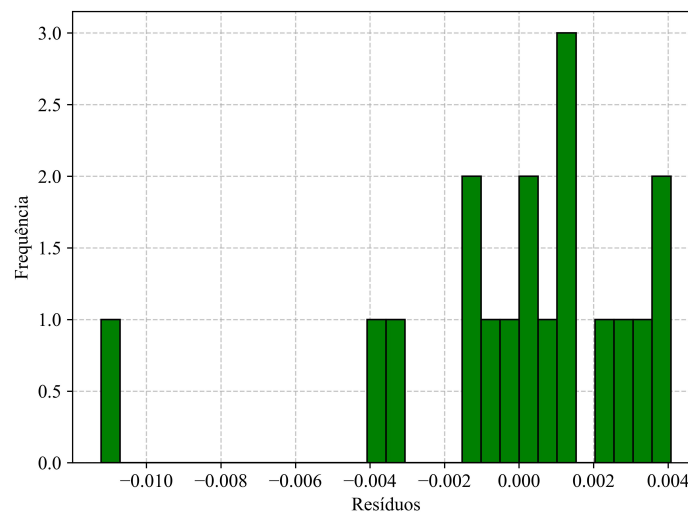


Figura 56 – Histograma de Resíduos (PCH Palmeiras)
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

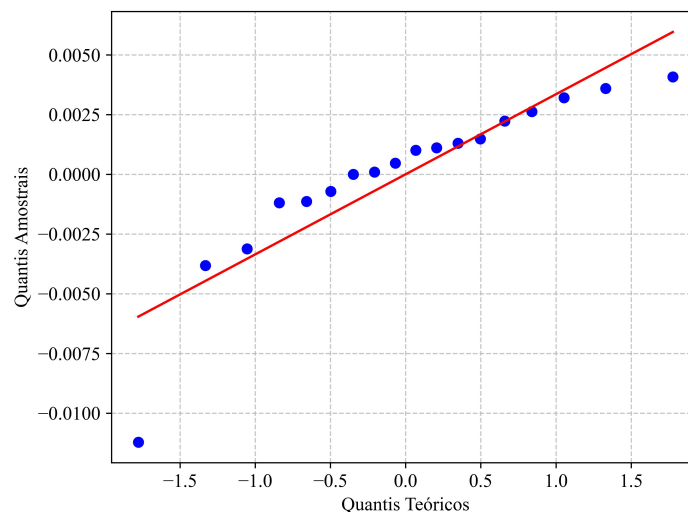


Figura 57 – Gráfico Q-Q Resíduos (PCH Palmeiras)
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

o qual pode indicar problemas no ajuste do modelo. A maioria dos resíduos está próximo à linha horizontal de referência, no caso o 0. As diferenças entre os valores observados e previstos são pequenos, na ordem de 0,004, na sua maioria. Há ausência de um padrão evidente. Os pontos estão dispersos de maneira aleatória, em destaque um ponto com despeço com resíduos na ordem de 0,001. Dessa forma o modelo não apresenta tendências sistemáticas nos resíduos, um bom indicativo para a adequação do modelo.

As Tabelas 30 e 31 apresentam os resultados da análise de regressão linear usando o MMQ para a PCH Retiro. O valor R^2 de 0,993 sugere que 99,3% da variabilidade nos dados é explicada pelo modelo, o que é extremamente alto e indica um ajuste muito bom. O valor R^2 ajustado de 0,990 ainda é muito alto, indicando que a maioria das variáveis independentes contribuem significativamente para explicar a variabilidade da

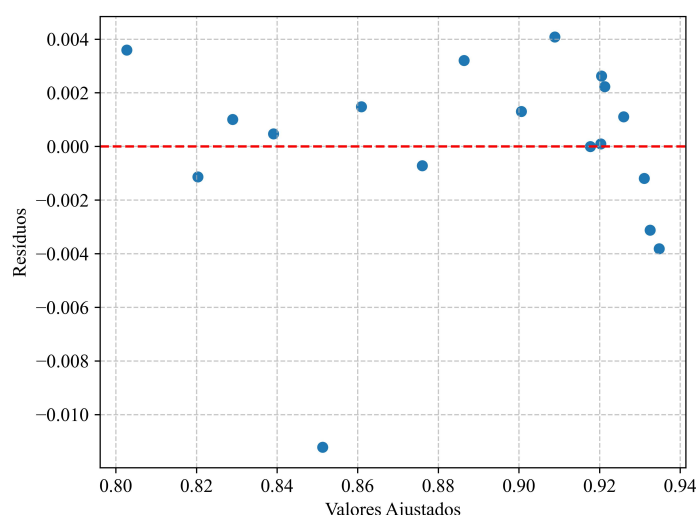


Figura 58 – Resíduos vs Valores Ajustados (PCH Palmeiras)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

variável dependente. A Estatística F muito alta e a probabilidade de significância (valor-p) extremamente pequeno indicam que o modelo é altamente significativo. O teste de *Omnibus* no valor de 0,647 e o valor-p de 0,723 sugere que os resíduos estão normalmente distribuídos. O cálculo do teste de *Durbin Watson* obteve um valor próximo de 1,635, sugere uma leve autocorrelação. O teste de *Jarque-Bera* apresentou estatística de 0,358 e valor-p de 0,836. Nesse caso não se pode rejeitar a hipótese nula de normalidade. Portanto os resíduos estão adequadamente distribuídos de acordo com a normalidade esperada.

Tabela 30 – Testes estatísticos da função de eficiência da PCH Retiro

| | Coeficiente | Erro Padrão | Teste t | Valor-p | Intervalo de Confiança (95%) | |
|-----------|------------------------|-----------------------|---------|---------|------------------------------|------------------------|
| | | | | | Inferior | Superior |
| Constante | -21,4013 | 7,346 | -2,913 | 0,013 | -37,406 | -5,396 |
| x_1 | 2,9449 | 1,032 | 2,852 | 0,015 | 0,695 | 5,194 |
| x_2 | 0,0754 | 0,021 | 3,559 | 0,004 | 0,029 | 0,122 |
| x_3 | -0,0975 | 0,037 | -2,669 | 0,020 | -0,177 | -0,018 |
| x_4 | $-6,55 \times 10^{-5}$ | $1,39 \times 10^{-5}$ | -4,731 | 0,000 | $-9,58 \times 10^{-5}$ | $-3,54 \times 10^{-5}$ |
| x_5 | -0,0049 | 0,001 | -3,310 | 0,006 | -0,008 | -0,002 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 59 exibe a distribuição dos resíduos do modelo estudado neste trabalho. A frequência dos resíduos está distribuída ao longo do eixo horizontal, que varia de aproximadamente -0,006 a 0,008. A maior parte dos resíduos está concentrada em torno de zero, com uma frequência maior em valores próximos de 0 e -0,002. O que é desejável e indica que, em média, o modelo não está sistematicamente subestimando ou superestimando os valores observados. A distribuição dos resíduos não parece ser perfeitamente simétrica. Há uma leve tendência de mais resíduos negativos em comparação com os positivos, o que pode indicar algum viés no modelo. A variabilidade dos resíduos é relativamente pequena,

Tabela 31 – Resultados de testes estatísticos para validação da equação de eficiência da turbina da PCH Retiro

| Estatística | Valor |
|----------------------|------------------------|
| R^2 | 0,993 |
| R^2 Ajustado | 0,990 |
| Estatística F | 352,3 |
| Prob (Estatística F) | $1,39 \times 10^{-12}$ |
| Omnibus | 0,647 |
| Prob (Omnibus) | 0,723 |
| Assimetria | 0,330 |
| Curtose | 2,796 |
| Durbin-Watson (DW) | 1,635 |
| Jarque-Bera (JB) | 0,358 |
| Prob (JB) | 0,836 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

dado que todos os resíduos estão dentro do intervalo de -0,006 a 0,008. Isso sugere que o modelo pode estar capturando bem a variabilidade dos dados observados. A distribuição relativamente compacta dos resíduos indica que o modelo tem uma boa precisão preditiva.

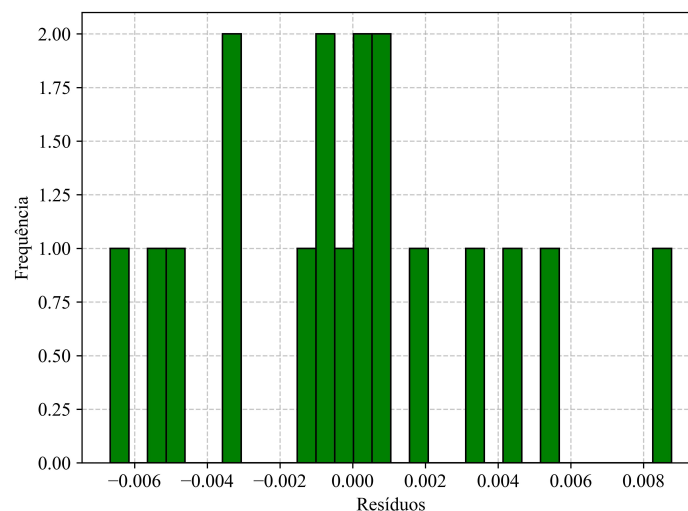


Figura 59 – Histograma de Resíduos (PCH Retiro)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O gráfico da Figura 60 apresenta os resíduos próximos à linha. Isso indica que os resíduos são aproximadamente normais. O que pode ser justificado pelo valor de curtose, o qual mede a “altura” e “largura” das caudas da distribuição. Um valor de curtose apresentado na Tabela 31, de 2,796, está ligeiramente abaixo de 3, indicando que a distribuição dos resíduos tem caudas um pouco mais leves do que a normal.

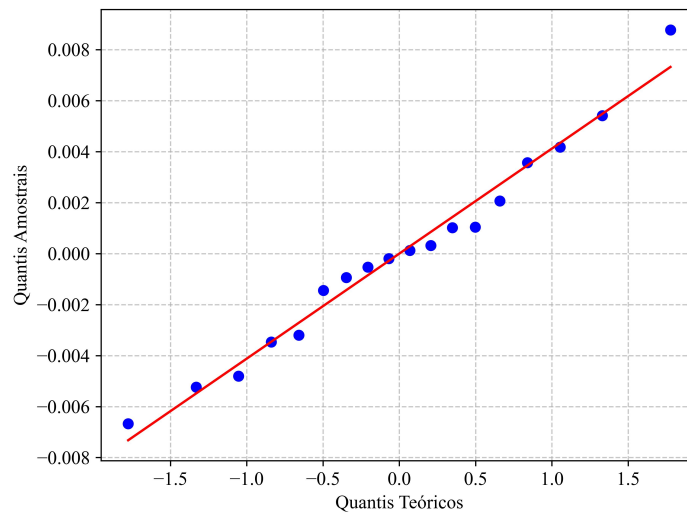


Figura 60 – Gráfico Q-Q dos Resíduos (PCH Retiro)
 Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

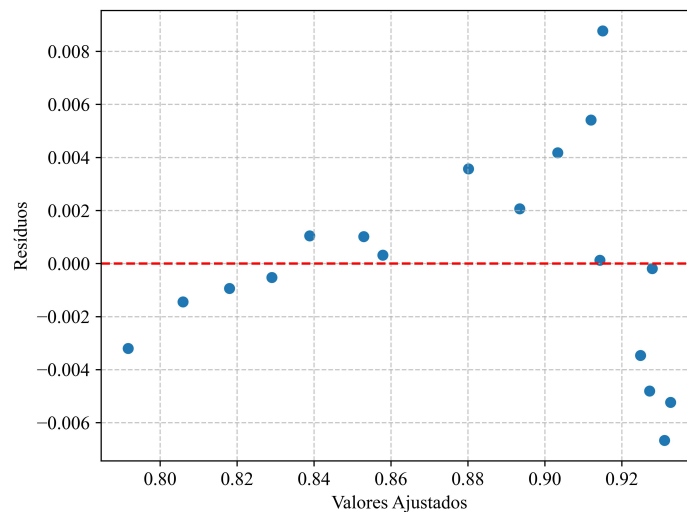


Figura 61 – Resíduos vs Valores Ajustados (PCH Retiro)
 Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

6.3 Resultados obtidos aplicando o modelo multiobjetivo NSGA II

Os resultados apresentados nessa seção são apenas um resumo dos resultados gerais. Os principais dados analisados foram: convergência na geração dos resultados, melhores soluções de Potência gerada, custos de O&M e perdas de carga etc.

6.3.1 Configurações do computador utilizado para otimização

Para este estudo, utilizou-se um computador *Dell Inspiron 15-3567* equipado com processador Intel® Core™ i5-8500 CPU @ 3.00GHz e 8 GB de RAM (7,81 GB utilizáveis).

Com sistema operacional de 64 bits, processador baseado em x64. O tempo médio de processamento do modelo para a otimização, considerando uma série histórica de 12 anos, foi de aproximadamente 3 horas. O volume total de dados gerados foi de 30,1 GB.

6.3.2 Análise de Convergência

As Figuras 62, 63, 64 representam as convergências dos objetivos normalizados ao longo das 100 gerações, aplicando o NSGA II para as PCHs em estudo para alguns meses do ano 2024. A Figura 65 apresenta a convergência para o sistema de PCHs em cascata no mesmo período. O objetivo 1, linha azul, representa a convergência da maximização da potência gerada de energia elétrica. O objetivo 2, linha laranja, representa a convergência para a minimização do Custo de Operação e Manutenção e por fim o objetivo 3, linha verde, representa a convergência de minimização das Perdas de carga.

Nas Figuras 62, 63, 64, o objetivos 1 variam mais ao longo das gerações, refletindo ajustes ao longo das gerações, o objetivo 2 mantém-se estável e elevado em todas as PCHs, o objetivo 3 oscila ao longo das gerações e tende a se estabilizar, apresenta uma correção com o objetivo 1. O modelo de otimização parece buscar um equilíbrio entre maximizar o potência gerada de energia, minimizar as perdas de carga e manter o custo de O&M estável. O modelo rodou para todos os meses da série estudada de 2013 a 2024.

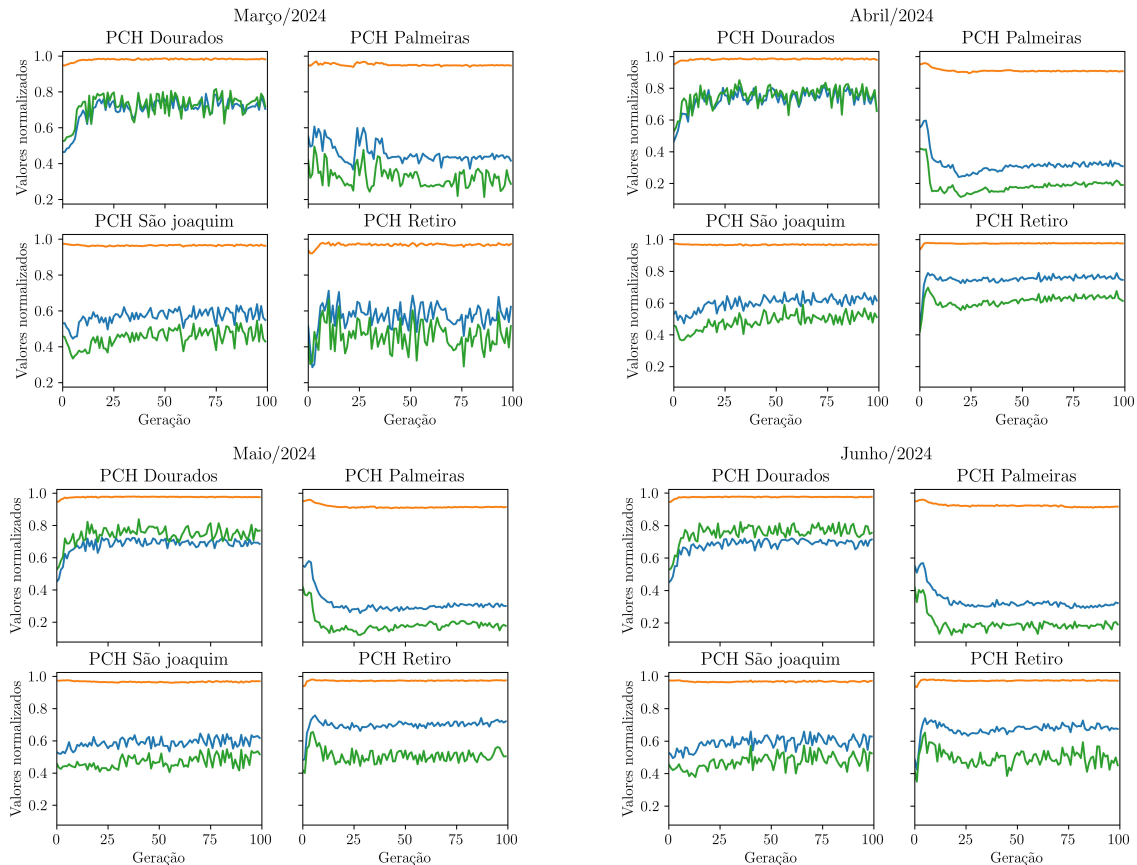


Figura 62 – Convergência dos objetivos normalizados para março a junho de 2024

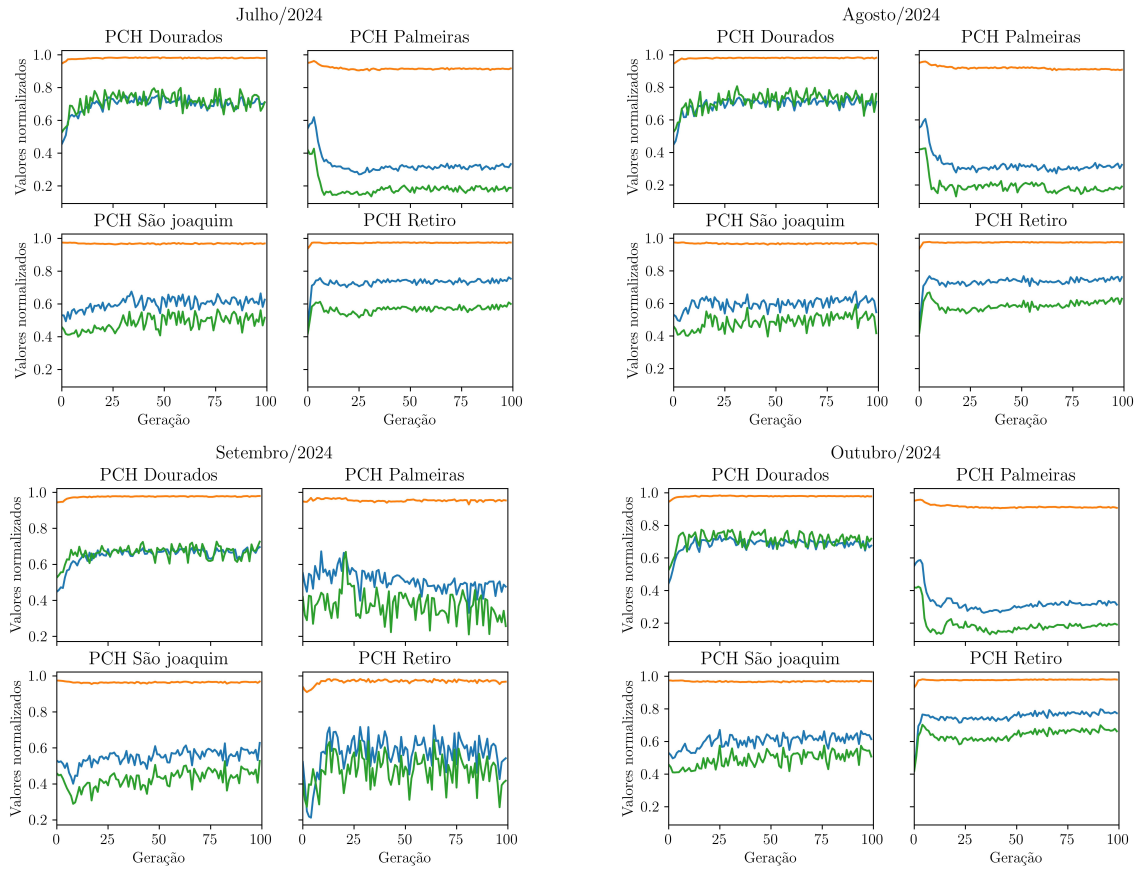


Figura 63 – Convergência dos objetivos normalizados para julho a outubro de 2024

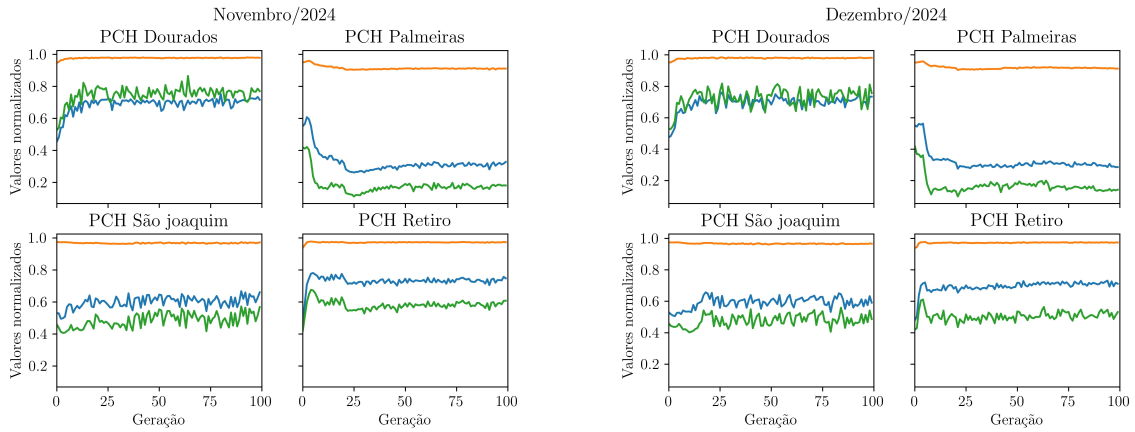


Figura 64 – Convergência dos objetivos normalizados para novembro e dezembro de 2024

Na Figura 65 o objetivo 1 inicialmente, apresenta um valor baixo e uma variação significativa. Após, em média 10 gerações aumenta os valores, estabiliza em um patamar superior a 0,75 (em dados normalizados). Isso sugere que o algoritmo conseguiu melhorar a potência na geração de energia rapidamente e, depois, refinou a solução sem grandes variações. Isso deve-se pelo fato de as restrições estarem muito bem definidas, dificultando o algoritmo percorrer por soluções não viáveis. Objetivo 2 mantém-se praticamente constante ao longo de todas as gerações. Isso pode indicar que o custo de Operação e Manutenção (O&M) não foi fortemente impactado pelas mudanças nas soluções. O objetivo 3, começa com um valor inicial relativamente baixo, na ordem de 0,4 (em valores normalizados), aumenta um pouco nas primeiras gerações, decai novamente em poucas gerações e estabiliza em um valor baixo, seguindo a mesma tendência do potencial de geração de energia. Isso indica que a minimização das perdas de carga foi eficaz e rápida. De modo geral o algoritmo convergiu bem para uma solução otimizada. Esse comportamento indica um bom equilíbrio entre os objetivos, sem sacrifícios extremos.

6.3.3 Análise das Melhores soluções

A Figura 66 apresenta a frente de Pareto com as melhores soluções da última geração, com os 500 melhores indivíduos para os meses do ano de 2024. Os gráficos apresentam as melhores soluções para os três objetivos considerados neste estudo. Neles, encontramos as representações das melhores soluções em relação a potência de gerada (f_1), objetivo 1, custo de Operação e Manutenção (O&M) (f_2), objetivo 2 e as perdas de cargas (f_3), objetivo 3. Os valores do objetivo 1 estão na ordem de 10^7 . A distribuição dos pontos sugere uma relação não linear entre os objetivos. A curvatura da frente de Pareto indica que as soluções otimizadas seguem um padrão específico, possivelmente resultante das restrições ou características muito específicas do problema.

Os dados da Tabela 32 apresentam a soma das melhores soluções de potência gerada apenas para o ano de 2016 e sua correspondente vazão e altura das respectivas PCHs.

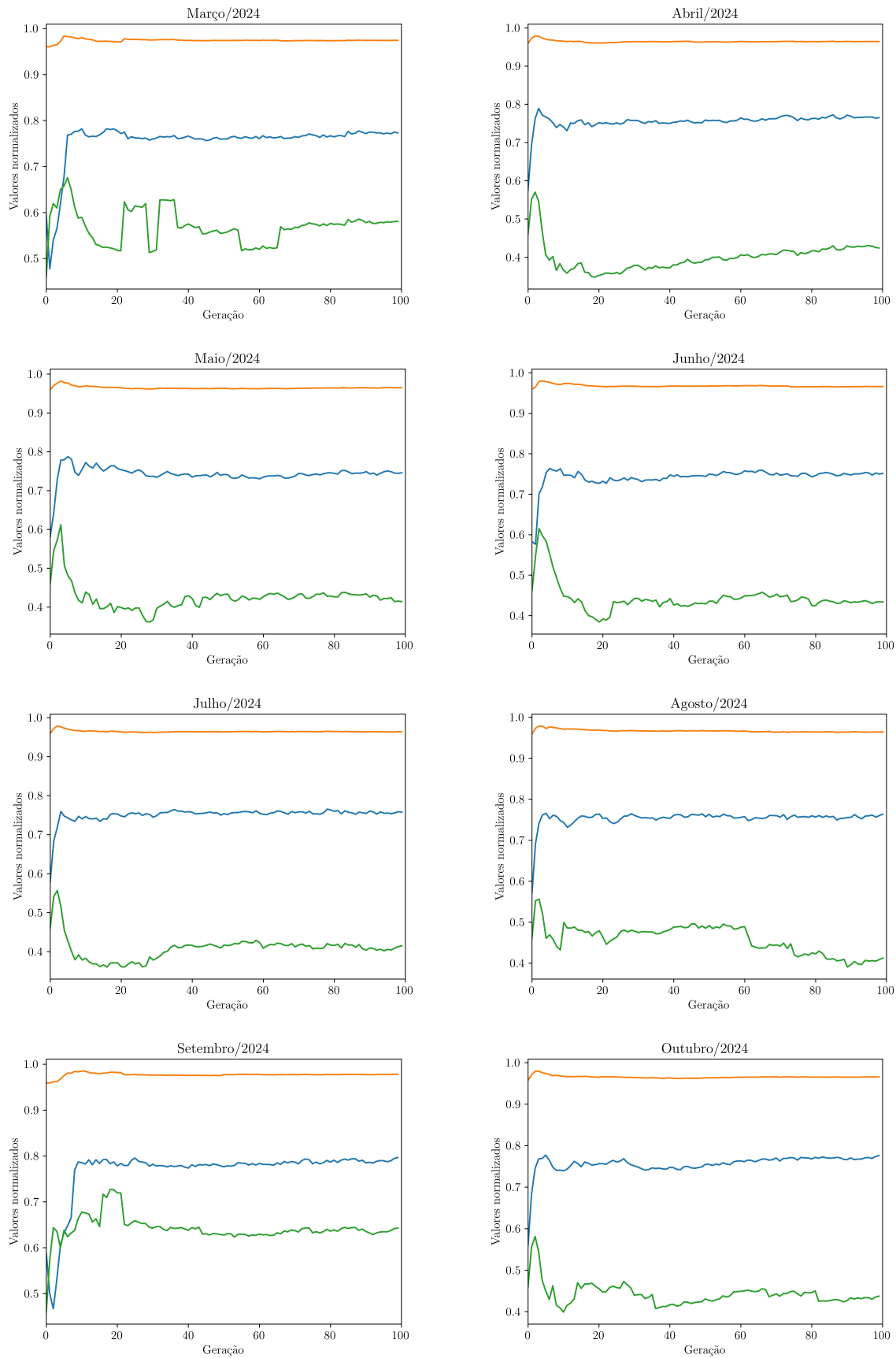


Figura 65 – Convergência dos objetivos normalizados, para o Sistema de PCHs em cascata para meses de março a outubro do ano de 2024

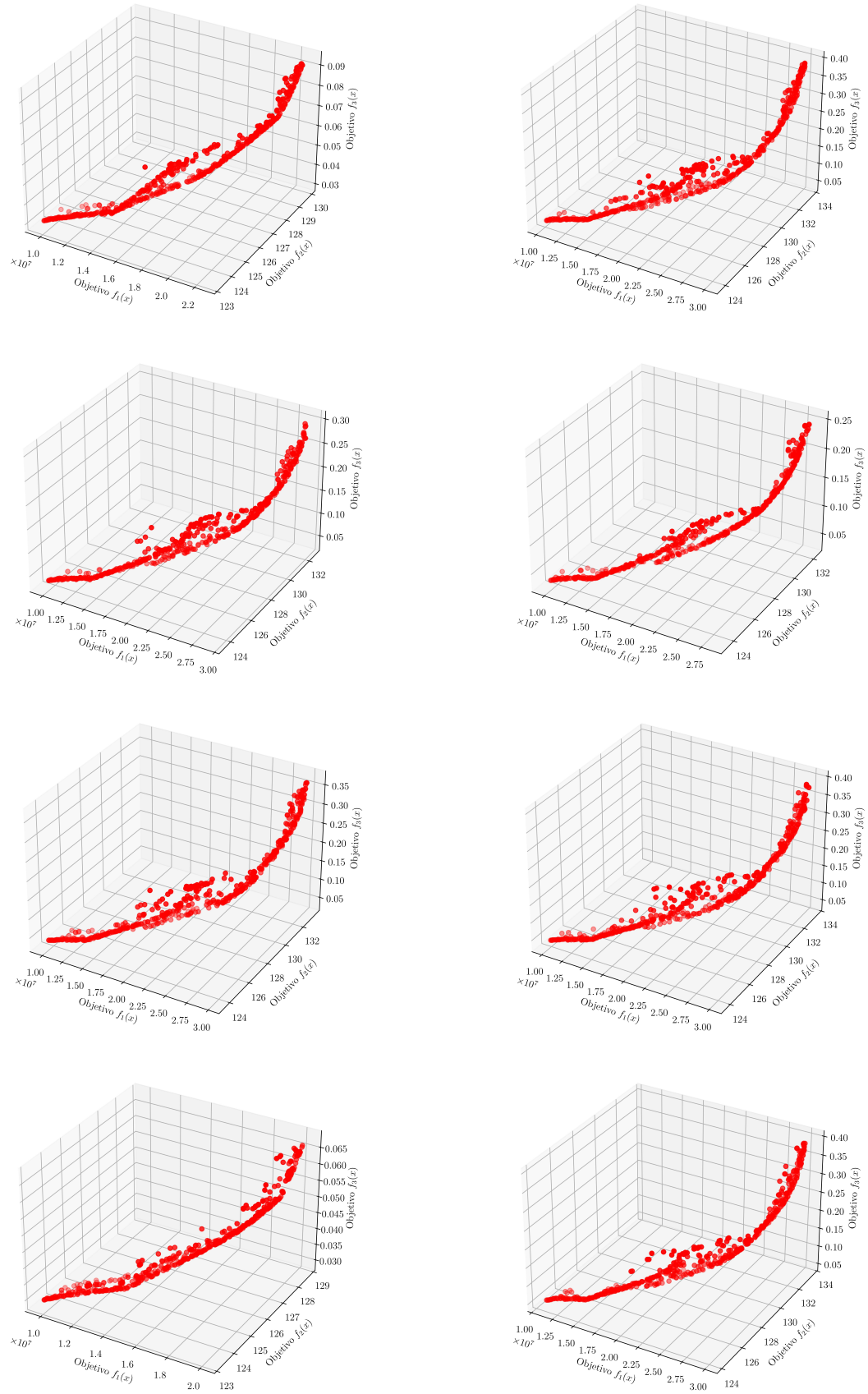


Figura 66 – Frente de Pareto com os 500 melhores indivíduos para o Sistema de PCHs em cascata para meses de março a outubro do ano de 2024

Esse levantamento também foi realizado para toda a série estudada. No entanto, esse ano foi escolhido de forma aleatória para embasar as conclusões deste estudo. Pode-se verificar as melhores soluções numéricas em função da altura líquida e da vazão turbinada de cada uma das PCHsem estudo. Os dados de melhor Potencia Gerada, custo de operação e manutenção e perdas de cargas para os demais anos podem ser consultados na Tabela 34, no **Apêndice A**.

Tabela 32 – Melhores soluções de potência total gerada, custo de O&M e perdas de carga do sistema em cascata das PCHs em estudo para o ano de 2016

| Mês | Potência (MW) | Custo de O&M (\$/MW) | Perdas de carga (m) | PCH Dourados | | PCH São Joaquim | | PCH Palmeiras | | PCH Retiro | |
|-----------|---------------|----------------------|---------------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|---------------|--------------|------------|--------------|
| | | | | Altura (m) | Vazão (m³/s) | Altura (m) | Vazão (m³/s) | Altura (m) | Vazão (m³/s) | Altura (m) | Vazão (m³/s) |
| Janeiro | 27,73 | 129,16 | 0,19 | 28,73 | 35,81 | 17,14 | 14,48 | 13,31 | 32,93 | 11,99 | 141,75 |
| Fevereiro | 20,13 | 127,17 | 0,06 | 28,24 | 34,38 | 17,16 | 14,42 | 13,31 | 32,50 | 12,66 | 56,62 |
| Março | 24,80 | 128,48 | 0,11 | 28,24 | 34,39 | 17,12 | 14,48 | 13,31 | 32,48 | 12,36 | 97,61 |
| Abril | 27,20 | 128,98 | 0,16 | 28,69 | 35,72 | 17,13 | 14,42 | 13,31 | 32,93 | 12,16 | 130,00 |
| Maio | 22,58 | 127,79 | 0,08 | 29,23 | 37,44 | 17,14 | 14,38 | 13,31 | 32,58 | 12,50 | 77,38 |
| Junho | 23,53 | 128,09 | 0,09 | 29,22 | 37,37 | 17,08 | 14,30 | 13,30 | 33,48 | 12,44 | 86,31 |
| Julho | 28,09 | 129,45 | 0,22 | 28,44 | 34,83 | 17,13 | 14,47 | 13,27 | 32,52 | 11,77 | 153,78 |
| Agosto | 26,31 | 128,69 | 0,14 | 29,18 | 37,19 | 17,15 | 14,48 | 13,31 | 32,60 | 12,25 | 115,45 |
| Setembro | 19,26 | 126,65 | 0,05 | 29,58 | 38,57 | 17,16 | 14,48 | 13,31 | 32,46 | 12,71 | 49,23 |
| Outubro | 26,53 | 128,94 | 0,14 | 28,24 | 34,40 | 17,13 | 14,40 | 13,29 | 33,80 | 12,24 | 118,54 |
| Novembro | 25,63 | 128,68 | 0,12 | 28,70 | 35,73 | 17,03 | 14,52 | 13,29 | 33,48 | 12,32 | 106,21 |
| Dezembro | 24,32 | 128,35 | 0,10 | 28,42 | 34,86 | 17,15 | 14,38 | 13,31 | 32,67 | 12,38 | 93,46 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O melhor valor de potência total ocorreu no mês de julho, atingindo aproximadamente 28,09 MW, considerando a soma das quatro PCHs. O custo médio de operação e manutenção foi de 129,45 \$/MW, enquanto a perda de carga média ficou na ordem de 0,22 m.

Observando a curva de permanência da vazão das PCHs Dourados e São Joaquim da Figura 31, em mais de 82% do tempo, a vazão operacional é garantida. Dessa forma, é possível que, de maneira objetiva, os operadores desses empreendimentos consigam atingir sempre o máximo de potência gerada, desde que combinem a melhor condição de vazão e altura possível. A própria estrutura civil das PCHs favorece o aproveitamento eficiente dos recursos hídricos. Isso ocorre ao desviar parte da vazão para a geração de energia por meio de um canal de adução, projetado para transportar um volume específico de água, respeitando as condições da vazão remanescente que deve ser mantida no rio. Em termos de oportunidades, há sempre vazão disponível para que os operadores possam alcançar a melhor quantidade de potência do empreendimento.

Considerando a curva de permanência de vazão da PCH Retiro e Palmeiras da Figura 32, as vazões correspondentes ao ponto intermediário da curva (como 50% do tempo, por exemplo) fornecem uma estimativa da vazão média em torno de 140 m³/s o que justifica uma boa estimativa para os operadores atuarem em uma vazão nesse intervalo de maneira mais segura. Em aproximadamente 10% do tempo, é possível ter a vazão disponível de 154 m³/s. Nesse caso, a potência gerada para os meses de janeiro e julho nas PCHs Retiro e Palmeiras tem a possibilidade de ocorrer em apenas 10% do tempo. Os meses de março, junho e dezembro apresentam uma vazão de permanência, em média, de 30% do tempo, em torno de 97 m³/s. Todas as vazões menores que 65 m³/s têm 50% de ocorrência.

O gráfico da Figura 67 apresenta a relação entre a soma total da potência mensal real gerada pelo conjunto de PCHs estudadas e a soma total da potência mensal estimada pelo modelo de otimização, considerando exclusivamente o ano de 2016. Os dados reais de potência foram disponibilizados pela CPFL e CTG Brasil. O conjunto de valores apresentou uma correlação de 0,02947, praticamente insignificante, o que impede a associação de um parâmetro de relação entre as variáveis simuladas e reais. O modelo NSGA II apresenta valores de potência gerada mais estáveis ao longo do ano e mantém acima da potência real total gerada na maioria dos meses. O valor da potência real gerada apresenta uma queda acentuada entre os meses de julho e setembro, atingindo seu ponto mínimo em setembro. Esse comportamento coincide com o período de menor disponibilidade hídrica. O modelo NSGA II consegue prever valores mais elevados e estáveis de potência gerada, indicando que a otimização pode trazer benefícios para a operação das PCHs em cascata. A diferença entre os valores reais e os valores do modelo pode ser explicada por fatores externos, como disponibilidade hídrica, eficiência operacional, restrições técnicas ou decisões de operação.

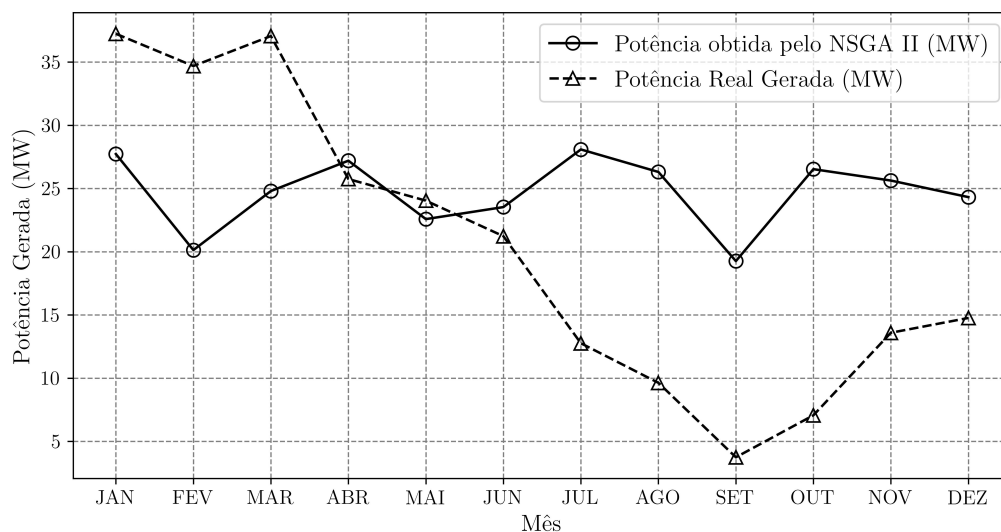


Figura 67 – Comparação da soma de Potência Real e potência obtida pelo NSGA II)
Fonte: Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Os resultados do NSGA II demonstraram um ganho significativo na Potência gerada na maioria dos meses do ano, principalmente no segundo semestre quando os recursos energéticos estão críticos. Os meses de abril e junho apresentaram ganho de 6% e 10% respectivamente; os meses de julho, agosto, setembro, outubro tiveram ganhos em mais de 100%; enquanto o meses de novembro e dezembro tiveram ganhos de 88% e 64% respectivamente .

O gráfico das Figuras 68, 69, 70, 71 mostra o Histograma com a frequência de melhores soluções por intervalo de altura de queda líquida, em metros, das PCHs Dourados, São

Joaquim, Palmeiras e Retiro, respectivamente, limitado ao intervalo de altura operacional. Dados da Tabela 33, do **Apêndice A**.

Para a PCH dourados o intervalo de melhores soluções apresentam em uma altura de queda líquida entre 28,23 m a 28,69 m, cerca de 41 ocorrências. Para quedas maiores entre 29,61 m a 30,07 m, obteve-se apenas 12 ocorrências. Para a PCH São Joaquim intervalo considerável foi entre 17,06 m a 17,16 m com cerca de 101 ocorrências. Para a PCH Palmeiras, as maiores alturas do intervalo entre 13,30 m e 13,31 m obtiveram as maiores ocorrências, seguida por 9 ocorrências de 13,28 m a 13,29 m. Para o caso da PCH retiro a medida que a altura aumenta os números de ocorrências são representativas, verifica-se que, na maior parte do intervalo de altura operacional, o número de soluções ótimas aumenta gradativamente. O intervalo de 12,45 m a 12,77 m apresentou 55 ocorrências.

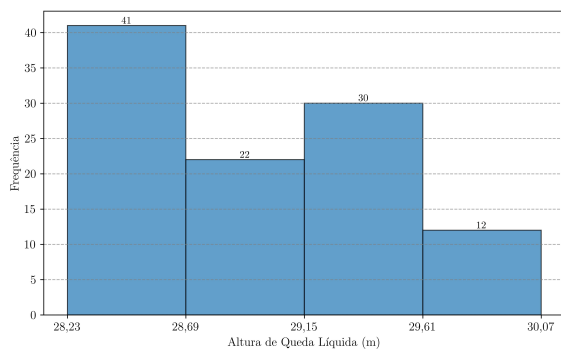


Figura 68 – Frequência de soluções para o intervalo de altura operacional (PCH Dourados)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

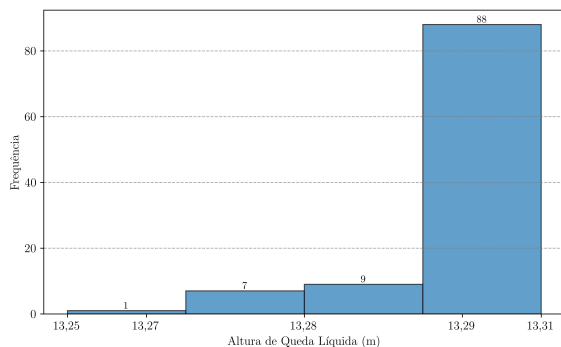


Figura 70 – Frequência de soluções para o intervalo de altura operacional (PCH Palmeiras)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

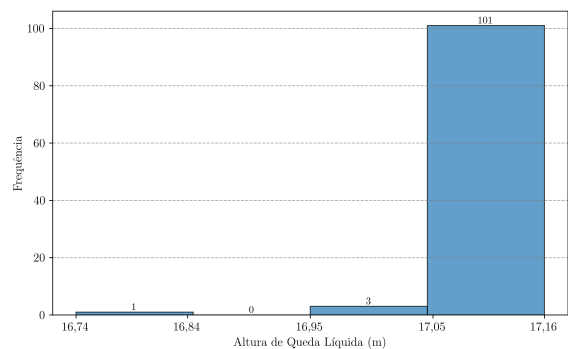


Figura 69 – Frequência de soluções para o intervalo de altura operacional (PCH São Joaquim)

Fonte: laborado pelo autor (2025)

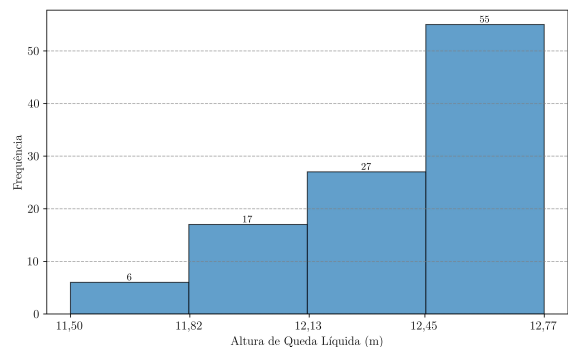


Figura 71 – Frequência de soluções para o intervalo de altura operacional (PCH Retiro)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Pode-se fazer essa mesma análise observando o Histograma das Figuras 72, 73, 74, 75 onde é mostrada a frequência de melhores soluções por intervalo de vazão, limitado ao intervalo de vazão operacional apresentado pelo modelo.

Para a PCH Dourados, o intervalo mais considerável de vazão ocorreu entre $32,15 \text{ m}^3/\text{s}$ a $40,32 \text{ m}^3/\text{s}$, com maior frequências observadas, totalizando cerca de 103 ocorrências.

Apenas duas ocorrências apareceram no intervalo de vazão mais baixa entre 26,70 m^3/s a 29,42 m^3/s .

Para a PCH São Joaquim, observa-se que as vazões associadas às melhores soluções ocorreram com maior frequência no intervalo de 13,39 m^3/s a 14,52 m^3/s , totalizando aproximadamente 103 ocorrências. Esse resultado indica que esse intervalo de vazão pode ser o mais favorável para otimização, possivelmente devido a condições operacionais mais eficientes nesse regime de fluxo. Apenas duas ocorrências no intervalo de vazão ente 8,89 m^3/s a 10,02 m^3/s .

Para a PCH Palmeiras, as melhores soluções de vazão foram registradas principalmente no intervalo entre 32,45 m^3/s e 33,65 m^3/s , com um total de 96 ocorrências, destacando-se como a faixa mais favorável. No intervalo seguinte, entre 33,65 m^3/s e 34,84 m^3/s , o número de ocorrências reduz significativamente para 7. Já nos intervalos 34,84 m^3/s a 36,04 m^3/s e 37,23 m^3/s a 38,43 m^3/s , foram registradas apenas 1 ocorrência em cada, indicando que esses valores de vazão são menos representativos em termos de soluções ótimas.

Para a PCH Retiro, observa-se que o número de soluções ótimas apresenta uma tendência de redução gradual à medida que a vazão aumenta, atingindo seu menor valor no intervalo de 109,61 m^3/s a 132,05 m^3/s , onde ocorre o mínimo ocorrências de soluções ótimas registradas. A partir desse ponto, há uma inversão na tendência, com um aumento no número de soluções ótimas para vazões superiores a 132,05 m^3/s , com cerca de 22 ocorrências. Destaca-se que o intervalo com a maior concentração de soluções ótimas ocorre entre 42,29 m^3/s e 64,73 m^3/s , com cerca de 36 ocorrências. Indicando que esse intervalo de vazão pode ser mais favorável à otimização dos parâmetros analisados.

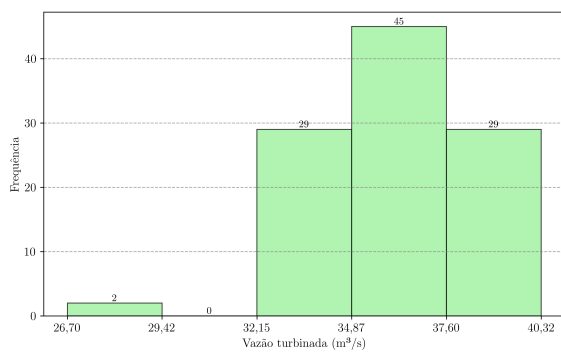


Figura 72 – Frequência de soluções para o intervalo de vazão operacional (PCH Dourados)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

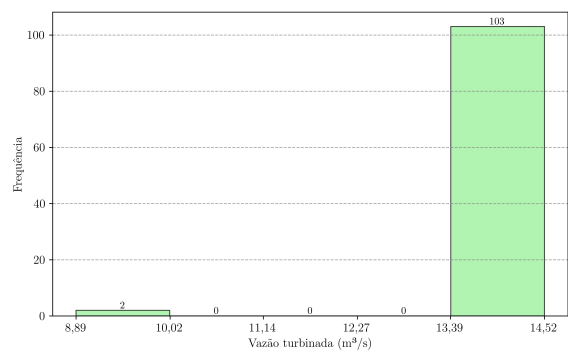


Figura 73 – Frequência de soluções para o intervalo de vazão operacional (PCH São Joaquim)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

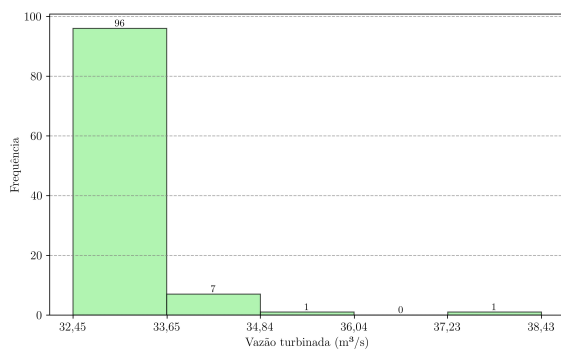


Figura 74 – Frequência de soluções para o intervalo de vazão operacional (PCH Palmeiras)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

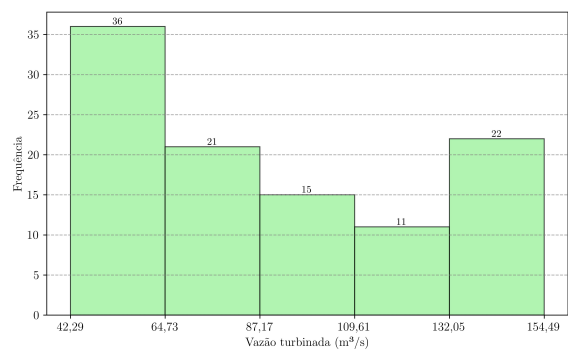


Figura 75 – Frequência de soluções para o intervalo de vazão operacional (PCH Retiro)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Conclusão

A metodologia aplicada no estudo para a função de eficiência do gerador e das turbinas demonstra-se bastante inovadora para o contexto das Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). Esses empreendimentos, por não contarem com grandes reservatórios, enfrentam desafios no gerenciamento e na previsão de geração de energia elétrica. Nesse sentido, o uso das variáveis vazão turbinada (Q_t) e altura de queda líquida (H_t) para a obtenção dos coeficientes da função de eficiência do gerador (η_g) e da turbina (η_t) aproxima os resultados à realidade operacional, oferecendo maior precisão na análise. Essa abordagem melhora as análises na geração de energia, dado que na maioria dos casos os estudos de geração de energia usam como parâmetro um valor constante para as variáveis η_g e η_t . Os testes estatísticos aplicados para a avaliação da função de eficiência das turbinas reforçam essa conclusão.

As curvas de eficiência dos geradores das PCHs estudadas, em geral, demonstraram-se ser eficientes e estáveis, com variações mínimas de rendimento ao longo de toda a faixa de potência. Em cenários onde a demanda de energia pode variar ao longo do tempo, essa característica garante que as PCHs mantenham-se um ótimo desempenho em praticamente todas as condições operacionais. Sem perdas significativas de eficiência do equipamento.

Os dados de potência total gerada nas PCHs em cascata, aplicando o NSGA II, foram significativos, principalmente nos meses de abril, junho, julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro (especialmente no segundo semestre do ano, quando os recursos hídricos estão mais escassos nessa região). No primeiro trimestre e no mês de maio, a potência real gerada foi maior. No entanto, nesse período, a região apresenta maior disponibilidade de recursos hídricos, tornando a energia mais barata. Dessa forma, há uma grande oportunidade de ganho financeiro com a otimização em cascata, principalmente no período de estiagem, quando a tarifa de energia está mais alta.

Uma limitação deste estudo é a ausência da consideração das dificuldades associadas às interações humanas, especialmente no que se refere à gestão e operação das usinas. Enquanto a CPFL possui outorga da ANEEL para a geração de energia elétrica nas PCHs

Dourados e São Joaquim, a concessão para geração de energias nas PCHs Palmeiras e Retiro pertencem à CTG Brasil, o que pode implicar diferenças nos processos operacionais, estratégicos entre as empresas.

Esse fato é observado para a maioria dos empreendimentos com característica de PCHS no Brasil. Nesse sentido é importante abordar uma discussão de regulação de operação de PCH em cascata junto a órgãos governamentais (ANEEL, ONS, CCEE etc) para uma garantia de uso eficiente e sustentável desses recursos energéticos.

Para as PCHs São Joaquim e Dourados, há uma maior oportunidade de obter as melhores soluções, pois, na maior parte do tempo, há disponibilidade hídrica. Nesse sentido, os operadores devem estar atentos à busca da melhor combinação entre vazão e altura. Para as PCHs Palmeiras e Retiro a oportunidade de aplicar o modelo se restringe a pequenos períodos com disponibilidade hídrica adequada.

Em todos os cenários estudados observou-se uma melhor faixa de vazão considerando os limites de operação da turbina. O conjunto de soluções da frente de Pareto mostraram uma correlação positiva entre Potência gerada e Perdas hidráulicas, Potência gerada e custo de operação & manutenção, Perdas de carga e Custo de operação & manutenção.

7.1 Principais Contribuições deste trabalho

- ❑ 2 artigos publicados em revista internacional; 1 artigo publicado em Simpósio internacional; 2 artigos publicados em Congressos Nacional e 1 Capítulo de Livro;
- ❑ Produção de material bibliográfico para estudo de Pequenas Centrais Hidrelétricas;
- ❑ Continuação de estudos de otimização aplicados à Engenharia Elétrica do Laboratório de Energias Alternativas e Proteção de Sistemas Elétricos (LEAPSE) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU);
- ❑ Utilização de modelagem matemática para análise objetiva da operação em cascata de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), visando contribuir com as abordagens subjetivas e promover uma análise mais precisa.

7.2 Proposta para trabalhos futuros

- ❑ Testar a aplicação de outros métodos de otimização multiobjetivo (*NSGA-III (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III)*; *SPEA2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2)*; *MOEA/D (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition)*; *NS-ES (Non-dominated Sorting Evolution Strategy)*; *SMP SO (Speed-constrained Multi-Objective Particle Swarm Optimization)*; *VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm)*; *WBGA (Weight-based Genetic Algorithm)*; Dentre outros.

- ❑ Colocar como variável de análise, no modelo multiobjetivo, uma ou mais funções como por exemplo: Análise ambiental e social; Redução de emissão carbono; Perda de probabilidade de fornecimento de energia; Geração de Energia para produção de Hidrogênio Verde (H2V); Múltiplos usos da água para o abastecimento de cidades, indústrias, irrigação e dessedentação de animais e demais usos consultivos.
- ❑ Criar uma função objetivo com base na portaria 403/2017 da ANEEL para o cálculo do benefício indireto das PCHs em cascata e incrementar ao problema multiobjetivo;
- ❑ Criar uma metodologia ou uma função empírica para descrever os custos de Operação e Manutenção (O&M) que relacione as características de vazão, alturas das PCHs estudadas;
- ❑ Realizar estudos de projetos de empreendimentos hidrelétricos aplicados à operação em cascata na região da Amazônia, com foco no uso de turbinas de reação. A análise deve considerar as características típicas da região, como baixas medidas de quedas d'água e altas vazões, visando maximizar a eficiência energética e minimizar os impactos ambientais;
- ❑ Desenvolver um *software* com interface gráfica para otimização multiobjetivo de energia em Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs). Os parâmetros de entrada incluem dados de ensaio e comissionamento do empreendimento, como vazão, altura, perdas, rendimentos, entre outros. O usuário pode escolher as funções de otimização do problema e o tipo de algoritmo utilizado, ajustando seus parâmetros (população, geração, tipo de mutação, cruzamento etc.). Como saída, o *software* pode apresentar tabelas das melhores soluções, gráficos da frente de Pareto, histogramas de frequências, gráficos de convergência, entre outras ferramentas.

Referências

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Nº 549, de 8 de outubro de 2002**. 2002. Acesso em: 01 jul. 2024. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/res2002549.pdf>>.

_____. **Resolução Nº 706, de 17 de dezembro de 2002**. 2002. Acesso em: 01 jul. 2024. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/res2002706.pdf>>.

_____. Resolução normativa nº 673, de 4 de agosto de 2015. 2015. Acesso em 20/01/2022. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-normativa-n-673-de-4-de-agosto-de-2015-85013148>>.

_____. **Resolução Normativa n.º 875, de 10 de março de 2020**. Brasília: [s.n.], 2020. Acesso em: 01 jul. 2024. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2020875.pdf>>.

_____. **Resolução Normativa Nº 875, de 10 de março de 2020**. 2020. Acesso em: 01 jul. 2024. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2020875.pdf>>.

_____. **Registro, autorização e concessão de empreendimentos de geração**. 2022. Acesso em 30 mai de 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/manuais-modelos-e-instrucoes/geracao/registro-autorizacao-e-concessao-de-empreendimentos-de-geracao>>.

_____. **Resolução Normativa n.º 1.070, de 29 de agosto de 2023**. Brasília: [s.n.], 2023. Acesso em: 01 jul. 2024. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231070.pdf>>.

_____. **Sistemas de Informações de Geração - SIGA**. 2024. Acesso em: 25 de Maio de 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao>>.

_____. **Pesquisa pública**. 2025. Publicado em 02/01/2025, atualizado em 23/04/2025. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/canais_atendimento/processo-eletronico/pesquisa-publica>.

_____. **Projeto base da PCH Palmeira**. Brasília: [s.n.], 2025. Documento institucional obtido por solicitação via canal “Fale Conosco”. Não publicado. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/canais_atendimento/fale-conosco1>.

_____. **Sistema de Informações de Geração - SIGA**. 2025. Acesso em 30 abr 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao>>.

Agência Nacional de Águas – ANA. **Hidroweb: sistemas de informações hidrológicas**. 2025. Acesso em 5 fev 2025. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>.

ALJARADIN, M.; UAMUSSE, M. M.; PERSSON, K. M. Micro-hydropower plant - energy solution used in rural areas, mozambique. **Sustainable Resources Management Journal**, v. 1, n. 1, p. 03–09, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.5281/zenodo.255257>>.

ANDRADE, S. O. **Pequenas centrais hidrelétricas: análise das causas que impedem a rápida implantação de PCHs no Brasil**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Regulação da Indústria de Energia)) — UNIFACS, Universidade de Salvador, Salvador, 2006. 132 f.

ARCE, A.; OHISHI, T.; SOARES, S. Optimal dispatch of generating units of the Itaipú hydroelectric plant. **IEEE Trans. Power Systems**, v. 17, n. 1, p. 154–158, Feb. 2002. DOI: <<https://doi.org/10.1109/59.982207>>.

Associação Brasileira de Geração de Energia Limpa. **Impactos positivos das PCHs para a transição energética: Soluções locais para questões climáticas globais**. 2024. Acesso em 8 de maio de 2024. Disponível em: <<https://abragel.org.br>>.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **NBR 6445:2016 - Turbinas hidráulicas, turbinas-bombas e bombas de acumulação**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2016. 53 p. Norma ABNT NBR Brasileira.

BAI, J.; NG, S. Tests for skewness, kurtosis, and normality for time series data. **Journal of Business & Economic Statistics**, v. 23, n. 1, p. 49–60, 2005. DOI: <<https://doi.org/10.1198/073500104000000271>>.

BARDESTANI, S. et al. Predicting turbulent flow friction coefficient using ANFIS technique. **Signal, Image and Video Processing**, v. 11, p. 341–347, 2017. DOI: <<https://doi.org/10.1007/s11760-016-0948-8>>.

BASTOS, A. S. et al. Análise das perdas de geração elétrica como consequência do incremento da rugosidade pelo fator temporal: Estudo de caso da PCH REPI. In: **XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Belo Horizonte: [s.n.], 2021. ISBN 2318-0358.

BASU, M. Dynamic economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm-II. **International Journal of Electrical Power Energy Systems**, v. 30, n. 2, p. 140–149, 2008. ISSN 0142-0615. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2007.06.009>>.

BELIK, M.; NOHACOVA, L. Small hydro power plants operating as backup source in local Island. In: **2019 20th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)**. Kouty nad Desnou, Czech Republic: [s.n.], 2019. p. 1–6. DOI: <<https://doi.org/10.1109/EPE.2019.8777948>>.

- BELLO, A. et al. **Energy Transition Program. Carbon Neutrality 2050: Scenarios for an Efficient Transition in Brazil**. 2023. <https://cebri.org/media/documentos/arquivos/PTE_RelatorioFinal_EN_5JUN.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2024.
- BERNADES, W. M. dos S. **Análises da proteção de sistemas de Energia Elétrica utilizando técnicas modernas de otimização heurísticas**. 226 p. Tese (Tese de Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- BEYER, H. G.; DEB, K. On self-adaptive features in real-parameter evolutionary algorithm. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 5, n. 3, p. 250–270, June 2001. DOI: <<https://doi.org/10.1109/4235.930314>>.
- BHATTI, T.; BANSAL, R.; KOTHARI, D. **Small Hydro Power Systems**. New Delhi, India: Dhanpat Rai & Co (P) Ltd., 2004.
- BOYAGHCHI, F.; SOHBATLOO, A. Assessment and optimization of a novel solar driven natural gas liquefaction based on cascade orc integrated with linear fresnel collectors. **Energy Conversion and Management**, v. 162, p. 77–89, 2018. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.013>>.
- CARLES-BOU, J. L.; GALÁN, S. F. Self-adaptive polynomial mutation in NSGA-II. **Soft Computing**, Springer, v. 27, n. 8, p. 1–22, 2023.
- Centrais Elétricas Brasileiras (ELETROBRAS). **Manuais e Diretrizes para Estudos e Projetos**. 2023. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudos-e-Projetos.aspx>>.
- CHATTERJEE, S.; HADI, A. S. **Regression Analysis by Example**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2006. DOI: <<https://doi.org/10.1002/0470055464>>. ISBN 9780471746966.
- China Three Gorges Brasil Energia S.A. (CTG Brasil). **PCH Palmeiras**. 2025. Acesso em: 1 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.ctgbr.com.br/unidade/pch-palmeiras/>>.
- _____. **PCH Retiro**. 2025. Acesso em: 1 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.ctgbr.com.br/unidade/pch-retiro/>>.
- CORNEY, J. et al. Small-scale hydropower. In: **Papers presented at the Sixteenth Consultative Council meeting of the Watt Committee on Energy**. London: [s.n.], 1984. ISBN 0-203-21033-6. ISSN 0141-9676.
- DAHMOUNI, A.; MOUTAOUAKIL, K. E.; SATORI, K. Clustering and Jarque-Bera normality test to face recognition. **Procedia Computer Science**, Elsevier, v. 127, p. 246–255, 2018. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.01.120>>.
- DEB, K. **Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms**. 1. ed. [S.l.]: Wiley & Sons, 2001. (Wiley-Interscience Series in Systems and Optimization). ISBN 0-471-87339-X.
- _____. **Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms: An Introduction**. Kanpur, India: Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur, 2011. PIN 208016.

- DEB, K.; AGARWAL, R. B. Simulated binary crossover for continuous search space. **Complex Systems**, v. 9, p. 115–148, April 1995.
- DEB, K. et al. A Fast Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 2, p. 182–197, April 2002. DOI: <<https://doi.org/10.1109/4235.996017>>.
- DENG, W. et al. An enhanced fast non-dominated solution sorting genetic algorithm for multi-objective problems. **Information Sciences**, v. 585, p. 441–453, 2022. ISSN 0020-0255. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.11.052>>.
- DETZEL, D. et al. Simulação da geração hidrelétrica utilizando curvas colina. In: **XII CBPE - Congresso Brasileiro de Planejamento Energético**. [S.l.: s.n.], 2020.
- DINIZ, A. L.; ESTEVES, P. P. I.; SAGASTIZABAL, C. A mathematical model for the efficiency curves of hydroelectric units. In: **IEEE PES General Meeting**. Tampa, FL: [s.n.], 2007. DOI: <<https://doi.org/10.1109/PES.2007.385632>>.
- EGRÉ, D.; MILEWSKY, J. C. The diversity of hydropower projects. **Energy Policy**, v. 30, p. 1225–1230, 2002. DOI: <[https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00083-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00083-6)>.
- Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Estudos para a licitação da expansão da geração: Metodologia de cálculo de parâmetros energéticos médios - Rendimento e Perda Hidráulica**. 2013. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-232/topico-204/EPE-DEE-RE-037-2011-r2.pdf>>.
- _____. **Nota Técnica EPE/DEE/026/2023-R0, Caderno de Tecnologias de Geração 2023: Evolução dos projetos cadastrados nos leilões de energia e suas Características Técnicas**. [S.l.], 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-745/Caderno%20de%20Tecnologias%20de%20Gera%C3%A7%C3%A3o%202023.pdf>>.
- _____. **Balanco Energético Nacional 2024: ano base 2023**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Relatório técnico. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf>>. Acesso em: 29 fev. 2025.
- European Small Hydropower Association (ESHA). **Small Hydropower Roadmap, Condensed Research Data for EU-27 2013**. [S.l.: s.n.], 2013.
- FAHIDY, T. Z. An application of Durbin–Watson statistics to electrochemical science. **Electrochimica Acta**, Elsevier, v. 51, n. 17, p. 3516–3520, 2006. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.09.046>>.
- FENG, J. et al. Runaway characteristics of a prototype bulb turbine considering upper and lower reservoirs based on lattice Boltzmann method. **Renewable Energy**, December 2022. Acesso em: 11 jun. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.11.121>>.

FERREIRA, J. H. I. **Um modelo de otimização multiobjetivo aplicado no dimensionamento da capacidade instalada de uma Pequena Central Hidrelétrica**. Tese (Doutorado em Engenharia) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2020.

FERREIRA, J. H. I. et al. Assessment of the potential of small hydropower development in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 56, p. 380–387, April 2016. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.035>>.

FILHO, D. S.; CARNEIRO, A. Dimensionamento evolutivo de usinas hidroelétricas. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática**, v. 15, n. 4, p. 437–448, 2004. DOI: <<https://doi.org/10.1590/S0103-17592004000400007>>.

FINARDI, E. C.; SILVA, E. L. da; SAGASTIZÁBAL, C. A. Solving the unit commitment problem of hydropower plants via lagrangian relaxation and sequential quadratic programming. **Computational and Applied Mathematics**, 2004. DOI: <<https://doi.org/10.1590/S0101-82052005000300001>>.

FOX, J. **Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models**. 3rd. ed. [S.l.]: SAGE Publications, Inc., 2016. ISBN 978-1-4522-0566-3.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. [S.l.]: Addison Wesley, 1989.

_____. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. 23rd. ed. [S.l.]: Addison-Wesley, 2002.

GREENE, W. H. **Econometric Analysis**. [S.l.]: Pearson Education, 2003. ISBN 9788178089744.

GRIFFITHS, D. V.; SMITH, I. M. **Numerical Methods for Engineers: A Programming Approach**. Boca Raton: CRC Press, 1991.

HANDL, J.; KNOWLES, J. Feature subset selection in unsupervised learning via multiobjective optimization. **International Journal on Computational Intelligence Research**, v. 2, n. 3, p. 217–238, 2006.

HIDALGO, I. G. et al. Efficiency curves for hydroelectric generating units. **Journal of Water Resources Planning and Management**, January 2014. DOI: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000258](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000258)>.

HUANG, L. et al. Balancing social, economic, and ecological benefits of reservoir operation during the flood season: A case study of the three gorges project, china. **Journal of Hydrology**, v. 572, p. 422–434, 2019. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.009>>.

IEA et al. **Tracking SDG7: The energy progress report 2023**. Geneva: International Energy Agency, International Renewable Energy Agency, United Nations Statistics Division, the World Bank and World Health Organization, 2023. Disponível em: <www.irena.org/Publications/2023/Jun/Tracking-SDG7-2023>.

IMAI, H. E. et al. Simulação computacional como ferramenta de otimização na geração de energia solar fotovoltaica. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 12, p. e20190343, 2020. DOI: <<https://doi.org/10.1590/2175-3369.012.e20190343>>.

International Energy Agency (IEA). **Energy Technology Perspectives 2010**. Paris: OECD/IEA, 2010.

International Renewable Energy Agency (IRENA). **Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series**. [S.l.], 2012. v. 1. Disponível em: <<http://www.irena.org/Publications>>.

_____. **World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway**. [S.l.: s.n.], 2021. <www.irena.org/publications>. ISBN 978-92-9260-334-2.

_____. **Tracking COP28 outcomes: Tripling renewable power capacity by 2030**. 2024. <www.irena.org/publications>.

IQBAL, M. et al. Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 640–654, 2014. ISSN 1364-0321. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.120>>.

JAIN, A.; KANAAN, T. A.; MAURER, L. T. A. **Unlocking the Energy Transition - Guidelines for Planning Solar-Plus-Storage Projects**. Washington, D.C., 2023.

JAIN, H.; DEB, K. Parent to mean-centric self-adaptation in sbx operator for real-parameter optimization. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 299–306, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-27172-4_37>.

JARDIM, A. M. d. R. F. et al. Modelling the Darcy–Weisbach friction factor and the energy gradient of the lateral line. **Irrigation and Drainage**, v. 71, n. 2, p. 320–332, 2022. DOI: <<https://doi.org/10.1002/ird.2658>>.

JUNIOR, C. S. M. **Avaliação de Modelos Polinomiais para Representar a Curva de Eficiência de Turbina Hidro-Geradoras**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Exatas, Departamento de Estatística, Programa de Especialização em Data Science e Big Data, Curitiba, 2020.

JUNIOR, J. G. P. **Modelos e Métodos de Tomada de Decisões Multiobjetivo em Ambiente com Incertezas e Suas Aplicações**. 198 p. Tese (Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2014.

KATOCH, S.; CHAUHAN, S. S.; KUMAR, V. A review on genetic algorithm: past, present, and future. **Multimedia Tools and Applications**, Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature, v. 80, p. 8091–8126, 2021. DOI: <<https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>>.

KOVALCHUK, O. A.; KULYK, V. V.; BURYKIN, O. B. Optimisation of joining circuits of extended power sources to local electric systems. **Technical Electrodynamics**, 2012. ISSN 1607-7970.

KUMAR, K.; SAINI, R. Economic analysis of operation and maintenance costs of hydropower plants. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 53, p. 102704, 2022. ISSN 2213-1388. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102704>>.

LAVRADOR, F. L.; COELHO, C. J.; SILVA, D. F. C. **Geração de curva de colina para turbina hidrelétrica usando Rede Neural Artificial**. Goiânia, GO, Brazil, 2021. 9-Dez-2021. Disponível em: <<https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/3714>>.

LEE, S.; NG, C. T. Normality test for multivariate conditional heteroskedastic dynamic regression models. **Economics Letters**, Elsevier, v. 111, n. 1, p. 75–77, 2011. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.econlet.2011.01.015>>.

LEITE, C. R. **Perda de capacidade de geração em centrais hidrelétricas por efeito da evolução temporal da rugosidade do circuito hidráulico da instalação**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/2233>>.

LEYLAND, B. **Small hydroelectric engineering practice**. New Zealand: CRC Press/Balkema, 2014. ISBN 978-1-315-81653-1.

LINCZUK, V. C. C.; BASTOS, L. E. G. Otimização multiobjetivo orientada ao desempenho térmico para o projeto de edificações de baixo consumo de energia na região sul do Brasil. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 4, p. 509–529, dezembro 2020. DOI: <<https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000400485>>.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos: uma importante ferramenta da Inteligência Computacional**. Rio de Janeiro: Brasport, 2006.

MAKERS, D. **Operation & Maintenance Strategies for Hydropower, Handbook for Practitioners and Decision Makers**. [S.l.]: International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, 2020.

MALAGOLI, J. A. **Otimização multiobjetivo aplicado aos motores de indução validada via elementos finitos**. 150 p. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

MALISZEWSKA-NIENARTOWICZ, J.; STEFAŃSKI, O. Decentralisation versus centralisation in Swedish energy policy: the main challenges and drivers for the energy transition at the regional and local levels. **Energy Policy**, v. 188, p. 114105, 2024. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114105>>.

MANZANEDO, F.; CASTRO, J. L.; PEREZ-DONSON, M. Application of evolutionary techniques to short-term optimization of hydrothermal systems. In: **Proceedings of the 2000 International Conference on Power Systems Technology – PowerCon 2000**. 4-7 Dec. 2000: [s.n.], 2000. v. 3, p. 1539–1544. DOI: <<https://doi.org/10.1109/ICPST.2000.898200>>.

MARCELINO, C. G. **Otimização de um Sistema de Controle Conjunto de Geração de Energia Hidrelétrica com o Emprego de Inteligência Computacional**. Dissertação (Mestrado) — CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS, Belo Horizonte – MG, 2012.

MATOS, M. **Aplicação de Algoritmos Genéticos para a Mineração de Regras SE-ENTÃO em Conjuntos de Dados com Distribuição Não-Linear**. Dissertação de Mestrado — Faculdade de Computação, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2018.

MILUKOW, H. A. et al. Estimation of the Darcy–Weisbach friction factor for ungauged streams using gene expression programming and extreme learning machines. **Journal of Hydrology (Amsterdam)**, v. 568, p. 311–321, 2019. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.073>>.

Ministério de Minas e Energia (MME). **PL do Combustível do Futuro propõe marco legal para a produção de combustíveis sintéticos no Brasil**. 2023. Acesso em: 7 maio 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/pl-do-combustivel-do-futuro-propoe-marco-legal-para-a-producao-de-combustiveis-sinteticos-no-brasil>>.

MOODY, L. F. Friction factors for pipe flow. **Transactions of the ASME**, v. 66, n. 8, p. 671–684, 1944. DOI: <<https://doi.org/10.1115/1.4018140>>.

MOORE, D. S.; MCCABE, G. P.; CRAIG, B. A. **Introduction to the Practice of Statistics**. 8. ed. [S.l.]: W. H. Freeman and Company, 2014. ISBN 978-1-4641-5893-3.

MÜLLER, F. et al. Análise da influência da hidrologia e do número de unidades no rendimento médio ponderado. In: **Anais do HydroVision Brasil**. [S.l.: s.n.], 2014.

NEBRO, A. J. et al. A study of the combination of variation operators in the NSGA-II algorithm. In: SPRINGER. **Advances in Artificial Intelligence: 15th Conference of the Spanish Association for Artificial Intelligence, CAEPIA 2013, Madrid, September 17-20, 2013, Proceedings**. [S.l.], 2013. p. 269–278. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-40643-0_28>.

NETO, A. R. P. **Modelo híbrido de otimização multiobjetivo para formação de células de manufatura**. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP - Brasil, 2008.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Diagrama esquemático das usinas hidrelétricas do SIN: usinas hidrelétricas despachadas pelo ONS na otimização da operação eletroenergética do Sistema Interligado Nacional**. 2019. <https://www.ons.org.br/sites/multimedia/Documentos%20Compartilhados/dados/DADOS2014_ONS/2_4.html>. Horizonte: 2015–2019. Disponível em: <https://www.ons.org.br/sites/multimedia/Documentos%20Compartilhados/dados/DADOS2014_ONS/2_4.html>.

PACHECO, M. A. C. Algoritmos genéticos: Princípios e aplicações. **ICA: Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada. Departamento de Engenharia Elétrica. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro**, v. 28, 1999.

PAES, R. P. de; COSTA, V. A. F.; FERNANDES, W. S. Efeitos da operação de aproveitamentos hidrelétricos em cascata nos padrões de vazão de curta duração a montante de planície de inundação. In: **Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Foz do Iguaçu: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRHidro), 2019. Acesso em: 30 abr. 2025. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/339721894>>.

PATRO, E.; KISHORE, T.; HAGHIGHI, A. Levelized cost of electricity generation by small hydropower projects under clean development mechanism in India. **Energies**, v. 15, p. 1473, 2022. DOI: <<https://doi.org/10.3390/en15041473>>.

PIMENTA, B. D. et al. Performance of explicit approximations of the coefficient of head loss for pressurized conduits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 22, p. 301–307, 2018. DOI: <<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p301-307>>.

PROÏA, F. Further results on the h-test of Durbin for stable autoregressive processes. **Journal of Multivariate Analysis**, Elsevier, v. 118, p. 77–101, 2013. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.jmva.2013.03.009>>.

RAGHUWANSHI, M. M.; KAKDE, O. G. Survey on multiobjective evolutionary and real coded genetic algorithms. In: **Proceedings of the 8th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems**. [S.l.: s.n.], 2004. p. 150–161.

RAMOS, T. P.; MARCATO, A. et al. Modelo para o despacho de usinas individualizadas no planejamento hidrotérmico de médio prazo baseado em pnl. **Revista Controle & Automação**, v. 23, n. 5, p. 594–607, 2012. DOI: <<https://doi.org/10.1590/S0103-17592012000500007>>.

RUBANENKO, O. et al. Hydroelectric power generation for compensation instability of non-guaranteed power plants. In: **2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)**. Istanbul, Turkey: [s.n.], 2020. p. 52–56. DOI: <<https://doi.org/10.1109/IEPS51250.2020.9263151>>.

SANTOS, A. H. M.; SILVA, B. C. da; MAGALHÃES, R. N. Estimação de custos de PCH. In: VII CBPE - CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO. **Energia 2030: Desafios para uma nova Matriz Energética**. São Paulo, SP, 2010.

SCHARDONG, A. **Aplicação de algoritmos evolucionários à gestão integrada de sistemas de recursos hídricos**. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011.

SCOLA, L. H. **Otimização multiobjetivo evolutiva da operação de sistemas de reservatórios multiusos**. Tese (Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2014.

SELAK, L. et al. Assessing feasibility of operations and maintenance automation – a case of small hydropower plants. In: **PROCEDIA CIRP. CIRPe 2015 - Understanding the life cycle implications of manufacturing**. [S.l.], 2015. v. 37, p. 164–169. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.101>>.

SILVA, F. W. M. da; CAMACHO, J. R.; FERREIRA, J. H. I. Analysis of hydraulic losses in the series from 1990 to 2022 at the retiro small hydroelectric power plant. **Heliyon**, v. 10, n. 8, p. e29627, 2024. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29627>>.

SINGAL, S. K.; SAINI, R. P. Analytical approach for cost estimation of low head small hydro power schemes. In: **International Conference on Small Hydro-power—Hydro Sri Lanka**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 4.

- SINGH, V.; NATH, T. Energy generation by small hydro power plant under different operating condition. **International Journal of Hydromechatronics**, v. 4, n. 4, p. 331–349, 2021. DOI: <<https://doi.org/10.1504/IJHM.2021.120611>>.
- SOUZA, P. A. P.; VALENCIO, N. F. L. da S.; MAUAD, F. F. Planejamento e gestão ambiental integrada quando da implantação de pchs. 2001. Acesso em: jan. 2023. Disponível em: <[http://www.researchgate.net/publication/237794405_PLANEJAMENTO_E_GESTO_AMBIENTAL_INTEGRADA_QUANDO_DA_IMPLANTAO_DE_PEQUENAS_CENTRAIS_HIDRELTRICAS_\(PCHs\)](http://www.researchgate.net/publication/237794405_PLANEJAMENTO_E_GESTO_AMBIENTAL_INTEGRADA_QUANDO_DA_IMPLANTAO_DE_PEQUENAS_CENTRAIS_HIDRELTRICAS_(PCHs))>.
- Tiago Filho, G. L. et al. Analysis of brazilian shp policy and its regulation scenario. **Energy Policy**, v. 39, n. 10, p. 6689–6697, 2011. ISSN 0301-4215. Sustainability of biofuels. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.001>>.
- Tiago Filho, G. L.; 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, p. 566–575, 2017. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.134>>.
- TSUANYO, D. et al. Design models for small run-of-river hydropower plants: a review. **Sustainable Energy Research**, v. 10, n. 3, 2023. DOI: <<https://doi.org/10.1186/s40807-023-00072-1>>.
- UNIDO, ICSHP. **World Small Hydropower Development Report 2022**. Vienna, Austria; Hangzhou, China: United Nations Industrial Development Organization, International Center on Small Hydro Power, 2022. Disponível em: <www.unido.org/WSHPDR2022>.
- VIANNA, D. S.; PULINI, I. C.; MARTINS, C. B. Using multi-objective genetic algorithm and multicriteria analysis for the production scheduling of a brazilian garment company. In: _____. [S.l.: s.n.], 2013. DOI: <<http://dx.doi.org/10.5772/53701>>.
- WALCZAK, N. Operational evaluation of a small hydropower plant in the context of sustainable development. **Department of Hydraulic and Sanitary Engineering, Poznan University of Life Sciences**, Poznań, Poland, 2018.
- World Bank. **Operation & Maintenance Strategies for Hydropower: Handbook for Practitioners and Decision Makers**. 1818 H Street NW, Washington, DC 20433: The World Bank, 2020. DOI: <<https://doi.org/10.1596/33313>>.
- YU, L. et al. Multi-objective optimal operation of cascade hydropower plants considering ecological flow under different ecological conditions. **Journal of Hydrology**, v. 601, p. 126599, 2021. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126599>>.
- YU, Y. et al. Energy transition: Connotations, mechanisms and effects. **Energy Strategy Reviews**, v. 52, p. 101320, 2024. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101320>>.
- YUKSEL, I. As a renewable energy hydropower for sustainable development in turkey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 3213–3219, 2010. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.056>>.

ZEMERO, B. R. et al. Methodology for preliminary design of buildings using multi-objective optimization based on performance simulation. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 141, n. 4, p. 1–12, 2019. DOI: <<https://doi.org/10.1115/1.4042244>>.

Apêndices

APÊNDICE A

Melhores Soluções obtidas pelo NSGA II

Tabela 33 – Melhores soluções de altura e vazão obtidas das PCHs em cascata para os anos de 2013 a 2024

| Data | PCH Dourados | | PCH São Joaquim | | PCH Palmeiras | | PCH Retiro | |
|----------------|---------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|------------------------------|
| | Altura (m) | Vazão (m ³ /s) | Altura (m) | Vazão (m ³ /s) | Altura (m) | Vazão (m ³ /s) | Altura (m) | Vazão (m ³ /s) |
| janeiro 2013 | 28,34 | 34,67 | 17,14 | 14,37 | 13,31 | 33,77 | 12,36 | 99,14 |
| fevereiro 2013 | 28,4 | 34,75 | 17,16 | 14,44 | 13,31 | 32,45 | 12,5 | 78,4 |
| março 2013 | 28,37 | 34,77 | 17,09 | 14,47 | 13,31 | 32,9 | 12,75 | 44,76 |
| abril 2013 | 28,38 | 34,77 | 17,16 | 14,45 | 13,28 | 32,8 | 11,64 | 151,79 |
| maio 2013 | 28,33 | 34,63 | 17,1 | 14,47 | 13,31 | 32,57 | 12,29 | 109,42 |
| junho 2013 | 28,54 | 35,19 | 17,13 | 14,46 | 13,31 | 33,26 | 11,88 | 149,92 |
| julho 2013 | 28,88 | 36,3 | 17,16 | 14,39 | 13,31 | 33,83 | 12,31 | 106,66 |
| agosto 2013 | 28,24 | 34,41 | 17,12 | 14,36 | 13,3 | 32,46 | 12,21 | 121,32 |
| setembro 2013 | 30,07 | 40,32 | 17,16 | 14,45 | 13,31 | 32,69 | 12,47 | 82,13 |
| outubro 2013 | 28,25 | 34,32 | 17,12 | 14,43 | 13,3 | 32,74 | 12,15 | 131,35 |
| novembro 2013 | 29,41 | 37,98 | 17,14 | 14,35 | 13,3 | 33,68 | 12,13 | 129,98 |
| dezembro 2013 | 28,77 | 35,89 | 17,16 | 14,34 | 13,3 | 32,57 | 12,24 | 118,43 |
| janeiro 2014 | 28,67 | 35,56 | 17,16 | 14,44 | 13,28 | 32,57 | 11,86 | 148,31 |
| fevereiro 2014 | 29,49 | 38,28 | 17,15 | 14,41 | 13,31 | 32,51 | 12,67 | 54,75 |
| março 2014 | 29,71 | 39,02 | 17,16 | 14,47 | 13,29 | 32,61 | 12,56 | 70,5 |
| abril 2014 | 28,78 | 35,66 | 17,14 | 14,33 | 13,31 | 32,56 | 11,8 | 149,49 |
| maio 2014 | 29,22 | 37,29 | 17,1 | 14,45 | 13,29 | 32,53 | 12,13 | 134,82 |

| Data | PCH Dourados | | PCH São Joaquim | | PCH Palmeiras | | PCH Retiro | |
|----------------|---------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|------------------------------|
| | Altura (m) | Vazão (m ³ /s) | Altura (m) | Vazão (m ³ /s) | Altura (m) | Vazão (m ³ /s) | Altura (m) | Vazão (m ³ /s) |
| junho 2014 | 28,75 | 35,8 | 17,15 | 14,44 | 13,3 | 33,06 | 12,22 | 121,15 |
| julho 2014 | 28,82 | 36,04 | 17,12 | 14,42 | 13,3 | 32,91 | 12,04 | 145,6 |
| agosto 2014 | 28,33 | 34,5 | 17,14 | 14,42 | 13,31 | 33,54 | 11,82 | 152,71 |
| setembro 2014 | 29,19 | 37,33 | 17,15 | 14,48 | 13,3 | 32,56 | 12,7 | 51,67 |
| outubro 2014 | 29,93 | 39,76 | 17,12 | 14,48 | 13,31 | 35,82 | 11,5 | 154,49 |
| novembro 2014 | 29,32 | 37,73 | 17,13 | 14,38 | 13,3 | 32,88 | 11,96 | 148,94 |
| dezembro 2014 | 28,5 | 35,13 | 17,09 | 14,44 | 13,3 | 32,57 | 11,92 | 139,45 |
| janeiro 2015 | 28,34 | 34,68 | 17,13 | 14,45 | 13,3 | 32,51 | 11,95 | 146,53 |
| fevereiro 2015 | 29,2 | 37,33 | 17,16 | 14,45 | 13,31 | 32,98 | 12,65 | 58,17 |
| março 2015 | 28,65 | 35,56 | 17,1 | 14,49 | 13,31 | 32,74 | 12,42 | 91,56 |
| abril 2015 | 29,64 | 38,81 | 17,15 | 14,48 | 13,27 | 38,43 | 11,57 | 151,46 |
| maio 2015 | 28,92 | 36,38 | 17,15 | 14,45 | 13,29 | 33,8 | 12,32 | 105,44 |
| junho 2015 | 29,12 | 37,05 | 17,1 | 14,46 | 13,3 | 32,98 | 11,89 | 149,12 |
| julho 2015 | 29,43 | 38,02 | 17,15 | 14,44 | 13,27 | 33,55 | 11,65 | 153,61 |
| agosto 2015 | 29,15 | 37,1 | 17,16 | 14,43 | 13,3 | 32,45 | 11,9 | 142,81 |
| setembro 2015 | 29,71 | 39,05 | 17,15 | 14,43 | 13,3 | 32,53 | 12,52 | 75,82 |
| outubro 2015 | 29,53 | 38,45 | 17,09 | 14,49 | 13,3 | 32,82 | 11,88 | 153,9 |
| novembro 2015 | 29,74 | 39,2 | 17,11 | 14,46 | 13,3 | 32,51 | 11,98 | 151,6 |
| dezembro 2015 | 28,34 | 34,55 | 17,13 | 14,48 | 13,31 | 32,45 | 12,08 | 139,77 |
| janeiro 2016 | 28,73 | 35,81 | 17,14 | 14,48 | 13,31 | 32,93 | 11,99 | 141,75 |
| fevereiro 2016 | 28,24 | 34,38 | 17,16 | 14,42 | 13,31 | 32,5 | 12,66 | 56,62 |
| março 2016 | 28,24 | 34,39 | 17,12 | 14,48 | 13,31 | 32,48 | 12,36 | 97,61 |
| abril 2016 | 28,69 | 35,72 | 17,13 | 14,42 | 13,31 | 32,93 | 12,16 | 130 |
| maio 2016 | 29,23 | 37,44 | 17,14 | 14,38 | 13,31 | 32,58 | 12,5 | 77,38 |
| junho 2016 | 29,22 | 37,37 | 17,08 | 14,3 | 13,3 | 33,48 | 12,44 | 86,31 |
| julho 2016 | 28,44 | 34,83 | 17,13 | 14,47 | 13,27 | 32,52 | 11,77 | 153,78 |
| agosto 2016 | 29,18 | 37,19 | 17,15 | 14,48 | 13,31 | 32,6 | 12,25 | 115,45 |
| setembro 2016 | 29,58 | 38,57 | 17,16 | 14,48 | 13,31 | 32,46 | 12,71 | 49,23 |
| outubro 2016 | 28,24 | 34,4 | 17,13 | 14,4 | 13,29 | 33,8 | 12,24 | 118,54 |
| novembro 2016 | 28,7 | 35,73 | 17,03 | 14,52 | 13,29 | 33,48 | 12,32 | 106,21 |
| dezembro 2016 | 28,42 | 34,86 | 17,15 | 14,38 | 13,31 | 32,67 | 12,38 | 93,46 |
| janeiro 2017 | 28,38 | 34,8 | 17,16 | 14,4 | 13,3 | 32,52 | 12,31 | 106,46 |

| Data | PCH Dourados | | PCH São Joaquim | | PCH Palmeiras | | PCH Retiro | |
|---------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| | Altura (m) | Vazão (m³/s) | Altura (m) | Vazão (m³/s) | Altura (m) | Vazão (m³/s) | Altura (m) | Vazão (m³/s) |
| março 2017 | 28,39 | 34,82 | 17,15 | 14,48 | 13,3 | 32,91 | 12,48 | 82,49 |
| abril 2017 | 28,23 | 28,92 | 16,74 | 9,63 | 13,31 | 33 | 12,33 | 104,72 |
| maio 2017 | 29 | 36,68 | 17,09 | 14,41 | 13,31 | 32,46 | 12,56 | 70,96 |
| junho 2017 | 28,27 | 34,46 | 17,12 | 14,4 | 13,31 | 32,68 | 12,54 | 73,22 |
| julho 2017 | 29,07 | 36,89 | 17,11 | 14,49 | 13,31 | 32,57 | 12,19 | 124,6 |
| agosto 2017 | 28,81 | 36,1 | 17,05 | 14,51 | 13,31 | 32,49 | 12,49 | 80,53 |
| setembro 2017 | 29,87 | 39,56 | 17,16 | 14,34 | 13,3 | 32,68 | 12,49 | 80,19 |
| outubro 2017 | 29,4 | 38 | 17,12 | 14,48 | 13,25 | 33,01 | 12,49 | 81,15 |
| novembro 2017 | 28,25 | 34,43 | 17,15 | 14,48 | 13,3 | 34,03 | 12,47 | 83,64 |
| dezembro 2017 | 28,6 | 35,43 | 17,15 | 14,47 | 13,29 | 32,56 | 12,52 | 75,14 |
| janeiro 2018 | 28,3 | 34,53 | 17,11 | 14,48 | 13,31 | 32,58 | 12,13 | 134,7 |
| março 2018 | 29,25 | 37,47 | 17,16 | 14,47 | 13,31 | 32,54 | 12,62 | 61,99 |
| abril 2018 | 29,55 | 38,46 | 17,13 | 14,3 | 13,3 | 32,47 | 12,36 | 97,15 |
| maio 2018 | 29,4 | 38,03 | 17,13 | 14,47 | 13,31 | 32,45 | 12,73 | 46,87 |
| junho 2018 | 28,89 | 36,28 | 17,14 | 14,48 | 13,31 | 32,45 | 12,68 | 51,66 |
| julho 2018 | 29,4 | 38 | 17,05 | 14,49 | 13,31 | 32,49 | 12,4 | 85,46 |
| agosto 2018 | 29,01 | 36,75 | 17,14 | 14,46 | 13,3 | 32,88 | 12,63 | 60,73 |
| setembro 2018 | 28,69 | 35,74 | 17,14 | 14,47 | 13,31 | 32,56 | 12,6 | 64,36 |
| outubro 2018 | 29,61 | 38,71 | 17,15 | 14,43 | 13,31 | 32,52 | 12,66 | 56,99 |
| novembro 2018 | 29,15 | 37,18 | 17,16 | 14,47 | 13,31 | 32,64 | 12,62 | 62,11 |
| dezembro 2018 | 28,83 | 36,04 | 17,16 | 14,48 | 13,3 | 32,46 | 12,67 | 55,93 |
| janeiro 2019 | 28,5 | 35,17 | 17,16 | 14,43 | 13,31 | 32,48 | 12,58 | 66,48 |
| março 2019 | 28,39 | 34,7 | 17,16 | 14,48 | 13,31 | 32,45 | 12,72 | 48,25 |
| abril 2019 | 28,58 | 35,35 | 17,16 | 14,45 | 13,3 | 32,8 | 12,63 | 61,62 |
| agosto 2019 | 29,41 | 38,05 | 17,14 | 14,47 | 13,31 | 32,65 | 12,72 | 48,22 |
| janeiro 2020 | 28,29 | 34,54 | 17,15 | 14,48 | 13,3 | 33,3 | 12,7 | 51,3 |
| abril 2020 | 28,97 | 36,53 | 17,16 | 14,46 | 13,31 | 32,67 | 12,72 | 48,11 |
| março 2021 | 28,23 | 26,7 | 17,13 | 8,89 | 13,31 | 32,67 | 12,76 | 42,77 |
| abril 2021 | 29,26 | 37,53 | 17,15 | 14,47 | 13,3 | 32,53 | 12,74 | 45,39 |
| janeiro 2022 | 28,25 | 34,43 | 17,16 | 14,34 | 13,3 | 32,45 | 12,71 | 48,97 |
| abril 2022 | 29,24 | 37,48 | 17,15 | 14,35 | 13,31 | 32,45 | 12,77 | 42,29 |
| junho 2022 | 28,95 | 36,55 | 17,15 | 14,46 | 13,31 | 32,56 | 12,73 | 47,54 |

| Data | PCH Dourados | | PCH São Joaquim | | PCH Palmeiras | | PCH Retiro | |
|---------------|---------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|---------------|------------------------------|---------------|------------------------------|
| | Altura (m) | Vazão (m ³ /s) | Altura (m) | Vazão (m ³ /s) | Altura (m) | Vazão (m ³ /s) | Altura (m) | Vazão (m ³ /s) |
| agosto 2022 | 29,62 | 38,75 | 17,15 | 13,73 | 13,31 | 32,46 | 12,74 | 45,01 |
| setembro 2022 | 29,49 | 38,32 | 17,1 | 14,48 | 13,31 | 32,77 | 12,68 | 52,94 |
| outubro 2022 | 29,69 | 39,01 | 17,15 | 14,47 | 13,29 | 32,48 | 12,67 | 54,86 |
| novembro 2022 | 28,89 | 36,36 | 17,16 | 14,44 | 13,28 | 32,67 | 12,69 | 51,8 |
| dezembro 2022 | 28,69 | 35,68 | 17,16 | 14,47 | 13,31 | 32,49 | 12,74 | 46,64 |
| março 2023 | 28,27 | 34,35 | 17,15 | 14,43 | 13,29 | 32,53 | 12,65 | 58,17 |
| abril 2023 | 28,83 | 36,13 | 17,15 | 14,47 | 13,3 | 32,5 | 12,62 | 62,03 |
| maio 2023 | 28,23 | 34,38 | 17,16 | 14,46 | 13,3 | 32,46 | 12,76 | 42,32 |
| junho 2023 | 28,53 | 35,25 | 17,1 | 14,47 | 13,3 | 33,61 | 12,21 | 120,8 |
| julho 2023 | 29,53 | 38,45 | 17,11 | 14,42 | 13,31 | 32,56 | 12,61 | 64,22 |
| agosto 2023 | 29,32 | 37,67 | 17,16 | 14,44 | 13,31 | 32,45 | 12,6 | 64,42 |
| setembro 2023 | 29,75 | 39,13 | 17,1 | 14,5 | 13,31 | 32,57 | 12,58 | 67,59 |
| novembro 2023 | 29,22 | 37,35 | 17,16 | 14,32 | 13,31 | 33,21 | 12,63 | 61,43 |
| dezembro 2023 | 29,48 | 38,26 | 17,16 | 14,45 | 13,31 | 32,52 | 12,67 | 55,03 |
| março 2024 | 28,24 | 34,4 | 17,15 | 14,32 | 13,31 | 32,7 | 12,31 | 106,86 |
| abril 2024 | 28,28 | 34,43 | 17,16 | 14,23 | 13,31 | 32,63 | 12,59 | 66,04 |
| maio 2024 | 28,53 | 35,25 | 17,14 | 14,47 | 13,31 | 32,87 | 12,4 | 93,47 |
| junho 2024 | 28,4 | 34,86 | 17,13 | 14,47 | 13,28 | 33,03 | 12,08 | 140,8 |
| julho 2024 | 28,55 | 35,29 | 17,1 | 14,35 | 13,31 | 32,68 | 12,53 | 75,03 |
| agosto 2024 | 29,75 | 39,03 | 17,16 | 14,25 | 13,31 | 32,64 | 12,51 | 77,73 |
| setembro 2024 | 28,25 | 34,44 | 17,14 | 14,45 | 13,29 | 32,73 | 12,6 | 65,42 |
| outubro 2024 | 29,44 | 38,09 | 17,12 | 14,42 | 13,31 | 34,4 | 12,25 | 112,75 |
| novembro 2024 | 29,16 | 37,17 | 17,16 | 14,46 | 13,31 | 32,74 | 12,37 | 97,5 |
| dezembro 2024 | 29,45 | 38,02 | 17,12 | 14,47 | 13,3 | 32,61 | 12,44 | 87,45 |

Tabela 34 – Melhores Valores de Potência, Custos de O&M e Perdas de Carga para os anos de 2013 a 2024

| Data | Potência (MW) | Custos (\$/MW) | Perdas de Carga (m) |
|----------------|---------------|----------------|---------------------|
| janeiro 2013 | 24,91 | 128,52 | 0,11 |
| fevereiro 2013 | 22,69 | 127,93 | 0,08 |

| Data | Potência (W) | Custos (\$/MW) | Perdas de Carga (m) |
|----------------|--------------|----------------|---------------------|
| março 2013 | 18,76 | 126,61 | 0,05 |
| abril 2013 | 28,08 | 129,49 | 0,21 |
| maio 2013 | 25,86 | 128,71 | 0,13 |
| junho 2013 | 27,98 | 129,31 | 0,21 |
| julho 2013 | 25,62 | 128,6 | 0,12 |
| agosto 2013 | 26,68 | 128,92 | 0,15 |
| setembro 2013 | 23,13 | 127,82 | 0,09 |
| outubro 2013 | 27,23 | 129,08 | 0,17 |
| novembro 2013 | 27,15 | 128,91 | 0,17 |
| dezembro 2013 | 26,44 | 128,78 | 0,14 |
| janeiro 2014 | 27,93 | 129,31 | 0,2 |
| fevereiro 2014 | 19,89 | 126,92 | 0,06 |
| março 2014 | 21,81 | 127,55 | 0,07 |
| abril 2014 | 27,78 | 129,24 | 0,21 |
| maio 2014 | 27,39 | 128,99 | 0,17 |
| junho 2014 | 26,67 | 128,86 | 0,15 |
| julho 2014 | 27,79 | 129,17 | 0,2 |
| agosto 2014 | 28,00 | 129,37 | 0,21 |
| setembro 2014 | 19,59 | 126,84 | 0,06 |
| outubro 2014 | 28,11 | 129,39 | 0,22 |
| novembro 2014 | 27,92 | 129,17 | 0,21 |
| dezembro 2014 | 27,61 | 129,22 | 0,18 |
| janeiro 2015 | 27,91 | 129,28 | 0,2 |
| fevereiro 2015 | 20,35 | 127,12 | 0,06 |
| março 2015 | 24,21 | 128,29 | 0,1 |
| abril 2015 | 28,13 | 129,51 | 0,22 |
| maio 2015 | 25,52 | 128,61 | 0,12 |
| junho 2015 | 27,98 | 129,23 | 0,21 |
| julho 2015 | 28,12 | 129,39 | 0,22 |
| agosto 2015 | 27,74 | 129,15 | 0,19 |
| setembro 2015 | 22,44 | 127,71 | 0,08 |
| outubro 2015 | 28,13 | 129,23 | 0,22 |
| novembro 2015 | 28,02 | 129,13 | 0,21 |

| Data | Potência (W) | Custos (\$/MW) | Perdas de Carga (m) |
|----------------|--------------|----------------|---------------------|
| dezembro 2015 | 27,60 | 129,14 | 0,18 |
| janeiro 2016 | 27,73 | 129,16 | 0,19 |
| fevereiro 2016 | 20,13 | 127,17 | 0,06 |
| março 2016 | 24,80 | 128,48 | 0,11 |
| abril 2016 | 27,20 | 128,98 | 0,16 |
| maio 2016 | 22,58 | 127,79 | 0,08 |
| junho 2016 | 23,53 | 128,09 | 0,09 |
| julho 2016 | 28,09 | 129,45 | 0,22 |
| agosto 2016 | 26,31 | 128,69 | 0,14 |
| setembro 2016 | 19,26 | 126,65 | 0,05 |
| outubro 2016 | 26,53 | 128,94 | 0,14 |
| novembro 2016 | 25,63 | 128,68 | 0,12 |
| dezembro 2016 | 24,32 | 128,35 | 0,1 |
| janeiro 2017 | 25,60 | 128,66 | 0,12 |
| março 2017 | 23,24 | 128,11 | 0,09 |
| abril 2017 | 20,27 | 127,25 | 0,11 |
| maio 2017 | 21,85 | 127,63 | 0,07 |
| junho 2017 | 22,10 | 127,81 | 0,07 |
| julho 2017 | 26,93 | 128,86 | 0,15 |
| agosto 2017 | 23,01 | 127,98 | 0,08 |
| setembro 2017 | 22,85 | 127,79 | 0,09 |
| outubro 2017 | 23,11 | 128,03 | 0,09 |
| novembro 2017 | 23,39 | 128,18 | 0,09 |
| dezembro 2017 | 22,37 | 127,85 | 0,08 |
| janeiro 2018 | 27,44 | 129,1 | 0,17 |
| março 2018 | 20,81 | 127,27 | 0,06 |
| abril 2018 | 24,64 | 128,28 | 0,11 |
| maio 2018 | 19,01 | 126,56 | 0,05 |
| junho 2018 | 19,52 | 126,86 | 0,05 |
| julho 2018 | 23,46 | 128,03 | 0,09 |
| agosto 2018 | 20,66 | 127,28 | 0,06 |
| setembro 2018 | 21,10 | 127,44 | 0,07 |
| outubro 2018 | 20,18 | 127 | 0,06 |

| Data | Potência (W) | Custos (\$/MW) | Perdas de Carga (m) |
|---------------|--------------|----------------|---------------------|
| novembro 2018 | 20,84 | 127,29 | 0,06 |
| dezembro 2018 | 20,03 | 127,07 | 0,06 |
| janeiro 2019 | 21,32 | 127,53 | 0,07 |
| março 2019 | 19,11 | 126,76 | 0,05 |
| abril 2019 | 20,75 | 127,37 | 0,06 |
| agosto 2019 | 19,17 | 126,63 | 0,05 |
| janeiro 2020 | 19,55 | 126,96 | 0,05 |
| abril 2020 | 19,12 | 126,68 | 0,05 |
| março 2021 | 11,99 | 124,55 | 0,03 |
| abril 2021 | 18,85 | 126,52 | 0,05 |
| janeiro 2022 | 19,19 | 126,83 | 0,05 |
| abril 2022 | 18,43 | 126,32 | 0,05 |
| junho 2022 | 19,09 | 126,65 | 0,05 |
| agosto 2022 | 18,37 | 126,32 | 0,05 |
| setembro 2022 | 19,72 | 126,87 | 0,06 |
| outubro 2022 | 19,96 | 126,94 | 0,06 |
| novembro 2022 | 19,59 | 126,94 | 0,06 |
| dezembro 2022 | 18,98 | 126,65 | 0,05 |
| março 2023 | 20,27 | 127,25 | 0,06 |
| abril 2023 | 20,80 | 127,33 | 0,06 |
| maio 2023 | 18,49 | 126,5 | 0,05 |
| junho 2023 | 26,70 | 128,93 | 0,15 |
| julho 2023 | 21,05 | 127,32 | 0,07 |
| agosto 2023 | 21,04 | 127,33 | 0,07 |
| setembro 2023 | 21,44 | 127,41 | 0,07 |
| novembro 2023 | 20,64 | 127,24 | 0,06 |
| dezembro 2023 | 19,96 | 126,93 | 0,06 |
| março 2024 | 25,59 | 128,65 | 0,12 |
| abril 2024 | 21,13 | 127,51 | 0,07 |
| maio 2024 | 24,43 | 128,35 | 0,1 |
| junho 2024 | 27,72 | 129,23 | 0,19 |
| julho 2024 | 22,29 | 127,82 | 0,08 |
| agosto 2024 | 22,47 | 127,7 | 0,08 |

| Data | Potência (W) | Custos (\$/MW) | Perdas de Carga (m) |
|---------------|--------------|----------------|---------------------|
| setembro 2024 | 21,22 | 127,57 | 0,07 |
| outubro 2024 | 26,07 | 128,67 | 0,13 |
| novembro 2024 | 24,79 | 128,34 | 0,11 |
| dezembro 2024 | 23,68 | 128,07 | 0,09 |