

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

WILLIAM GUSTAVO MANTOVANI

**AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO PARA A EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA EM UMA CENTRAL GERADORA HIDRELÉTRICA (CGH), NA CIDADE
DE TIBAGI, PARANÁ**

PONTA GROSSA

2022

WILLIAM GUSTAVO MANTOVANI

AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO PARA A EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA CENTRAL GERADORA HIDRELÉTRICA (CGH), NA CIDADE DE TIBAGI, PARANÁ

Evaluation of operation for efficiency in the generation of electric energy in a Small Hydropower Plant (SHP), in the city of Tibagi, Paraná

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Claudia Tania Picinin.

PONTA GROSSA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

WILLIAM GUSTAVO MANTOVANI

AVALIAÇÃO DA OPERAÇÃO PARA A EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA CENTRAL GERADORA HIDRELÉTRICA (CGH), NA CIDADE DE TIBAGI, PARANÁ

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 22/junho/2022

Claudia Tania Picinin
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Eliane Fernandes Pietrovski
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Gustavo Tadra Waldmann
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2022

Dedico este trabalho a minha esposa
Juliane e a minha filha Lívia pelos
momentos importantes em que me fiz
ausente.

AGRADECIMENTOS

Momentos longos em dedicação a este trabalho e um projeto longo que se iniciou aqui, abrindo meus olhos para o esforço em um novo horizonte de pesquisa e para a minha profissionalização.

Agradeço primeiramente a Deus pela a oportunidade de estar presente onde estou, com as pessoas importantes e únicas ao meu redor que sempre me apoiaram e incentivaram na busca do que tanto desejo.

Agradeço aos meus pais, Angela e Valdecir, e ao meu irmão Giovanni, pela oportunidade, confiança e por tanto acreditarem em mim nos diversos momentos da vida que já passamos juntos, tanto em família quanto dentro do negócio.

Agradeço a minha esposa Juliane pela paciência e suporte com a dedicação total que sempre tem a nossa filha Lívia, em todos os momentos deste trabalho, principalmente nos momentos em que estive ausente.

Agradeço a UTFPR-PG pela a oportunidade da minha profissionalização com os grandes professores dentro do departamento de Engenharia de Produção, principalmente a minha Orientadora Claudia, que aceitou este desafio juntos, com seu conhecimento e apoio em todos os momentos.

Agradeço as empresas envolvidas neste estudo bem como os seus sócios, que disponibilizaram o acesso a todos os dados necessários para esta pesquisa, com confiança e tranquilidade.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma ajudaram e apoiaram para a realização deste estudo.

RESUMO

Com a crescente necessidade de geração de energia através de meios ambientalmente corretos, apontam-se investimentos cada vez mais intensos às usinas hidrelétricas de fio de água, principalmente no Brasil pela disponibilidade de recursos hídricos. Entretanto, com estas novas buscas em investimento e de novas tecnologias, muitas vezes são deixadas de lado a avaliação das condições de eficiência da geração de energia elétrica em estruturas em operação. Assim, através deste estudo de caso aplicado a uma usina hidrelétrica em operação, pretende-se avaliar a operação da Central Geradora Hidrelétrica (CGH) para a eficiência na geração de energia elétrica, instalada na cidade de Tibagi, no estado do Paraná. Foram aplicados neste estudo, ferramentas e estatísticas disponíveis para a avaliação e proposto um modelo matemático para apoio a tomada de decisão de operação da usina instalada indicando os fatores dependentes para esta operação. Inclui no desenvolvimento deste estudo, o tratamento e avaliação dos dados coletados, a relação entre a teoria de projeto ideal da usina e a prática, propondo o modelo matemático com ações de melhoria para a estrutura instalada e assim, concluindo o estudo apresentando a importância das variáveis de vazão e queda líquida para a operação na usina fio de água estudada.

Palavras-chave: engenharia organizacional; eficiência energética; geração de energia; usina hidrelétrica.

ABSTRACT

With the growing need for energy generation through environmentally correct means, increasingly intense investments are made in run-of-river hydroelectric plants, mainly in Brazil due to the availability of water resources. However, with these new searches for investment and new technologies, the evaluation of the efficiency conditions of electric energy generation in structures in operation are often left aside. Thus, through this case study applied to a hydroelectric plant in operation, it is intended to evaluate the operation of the Small Hydropower Plant (SHP) for the efficiency in the generation of electric energy, installed in the city of Tibagi, in the state of Paraná. In this study, tools and statistics available for the evaluation were applied and a mathematical model was proposed to support the decision-making of the operation of the installed plant, indicating the dependent factors for this operation. It includes in the development of this study, the treatment and evaluation of the collected data, the relationship between the ideal project theory of the plant and the practice, proposing the mathematical model with improvement actions for the installed structure and thus, concluding the study presenting the importance of variables of flow and net head for the operation in the water plant studied.

Keywords: organizational engineering; energy efficiency; power generation; hydroelectric plant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Intensidade das correlações positivas e negativas	55
Figura 2: Interface do SPSS® <i>Statistics</i>	59
Figura 3: Apresentação da interface Spyder	61
Figura 4: Tela de referência supervisorio utilizado para coleta de Dados	70
Figura 5: Apresentação de amostra dos dados brutos coletadas em planilha	75

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1: Imagem de Satélite Google Earth da usina hidrelétrica estudada	41
Fotografia 2: Duas turbinas instalada do tipo Francis, totalizando 5MW de potência instalada	42
Fotografia 3: Características gerais da CGH estudada	43
Fotografia 4: Região da tomada d'água	43
Fotografia 5: Região da Câmara de Carga	44
Fotografia 6: Local dos Conduitos Forçados e Casa de Força	45
Fotografia 7: Realização de topografia queda efetiva na Câmara de Carga	69

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Modelo de histograma simples	53
Gráfico 2: Boxplot simples e suas características	54
Gráfico 3: Resultados de documentos na base de dados Scopus® por ano para TITLE-ABS-KEY com o termo ['SPSS <i>Statistics</i> ' AND ' <i>data analysis</i> '].....	58
Gráfico 4: Resultados de documentos por país ou território na base de dados Scopus® por ano para TITLE-ABS-KEY com o termo ['SPSS <i>Statistics</i> ' AND ' <i>data analysis</i> ']	58
Gráfico 5: Resultados de documentos na base de dados Scopus® por ano para TITLE-ABS-KEY com o termo ['python' AND ' <i>data analysis</i> '].....	60
Gráfico 6: Análise dados nível de canal de referência para tratamento de dados.....	76
Gráfico 7: Gráfico dispersão para verificação e tratamento de dados.....	79
Gráfico 8: Curva de rendimento Turbina	81
Gráfico 9: Curva de Rendimento do Gerador.....	82
Gráfico 10: Curva da Vazão em relação ao Distribuidor e Queda Efetiva	83
Gráfico 11: Boxplot Queda Efetiva por agrupador.....	84
Gráfico 12: Série temporal queda efetiva do agrupador 5.....	85
Gráfico 13: Série temporal total potência do agrupador 5.....	86
Gráfico 14: Série temporal queda efetiva do agrupador 1	86
Gráfico 15: Série temporal total potência do agrupador 1	87
Gráfico 16: Gráfico de correlação de Pearson para UG1	88
Gráfico 17: Gráfico de correlação de Pearson para UG2.....	90
Gráfico 18: Pareto para Ordem de Serviço Manutenções Usina.....	92
Gráfico 19: Histograma e Boxplot para Potência Total do Sistema.....	93
Gráfico 20: Distribuição acumulada Potência Total do Sistema e sua probabilidade	94
Gráfico 21: Regressão para avaliação de verificação de fórmulas.....	101

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Quantidade de artigos por seção no referencial teórico	18
Quadro 2: Combinações dos temas por referência, seção 2.1.....	25
Quadro 3: Quantidade de referências subtópicos da seção 2.2.....	26
Quadro 4: Combinações dos temas por referência, subtópico 2.2.1	29
Quadro 5: Combinações dos temas por referência, subtópico 2.2.2.....	31
Quadro 6: Combinações dos temas por referência, subtópico 2.2.3.....	34
Quadro 7: Combinações dos temas por referência, subtópico 2.2.4.....	36
Quadro 8: Combinações dos temas por referência, seção 2.3.....	37
Quadro 9: Combinações dos temas por referência, seção 2.4.....	39
Quadro 10: Site de documentação bibliotecas utilizadas	61
Quadro 11: Variáveis coletadas para a avaliação de operação	63
Quadro 12: Correlação de Pearson para UG1 para dados tratados	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados rendimento Turbina Instalada.....	67
Tabela 2: Dados rendimento Gerador Instalado.....	67
Tabela 3: Dados de teste de vazão da turbina em relação a razão do distribuidor e queda efetiva.....	68
Tabela 4: Dados observados para formulação teórica/prática	69
Tabela 5: Total de Capturas de imagens realizadas por dia	71
Tabela 6: Continuação	71
Tabela 7: Dados boxplot apresentado no Gráfico 6	77
Tabela 8: Resumo Informações Teóricas de Projeto	95
Tabela 9: Referências de equação para cálculo	100

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização	14
1.2	Problema de pesquisa e sua delimitação.....	15
1.3	Objetivos	15
1.4	Justificativa.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	Eficiência Energética	19
2.2	Eficiência de Produção	25
2.2.1	Planejamento de capacidade e desempenho.....	26
2.2.2	Operação.....	29
2.2.3	Algoritmos e Otimizações	31
2.2.4	Equipamentos.....	35
2.3	Eficiência energética e de produção	36
2.4	Revisões Científicas ao redor do tema.....	38
3	METODOLOGIA	41
3.1	A Central Geradora Hidrelétrica Estudada.....	41
3.2	Descrição das etapas da pesquisa	46
3.2.1	Avaliação geral da estrutura.....	48
3.2.2	Avaliação teórica	48
3.2.3	Avaliação prática	48
3.2.4	Avaliação entre o teórico ideal e prática.....	49
3.2.5	Orientações para a prática	50
3.3	Ferramentas Utilizadas	51
3.3.1	Avaliação teórica	51
3.3.2	Estatística	52
<u>3.3.2.1</u>	<u>Avaliação gráfica</u>	<u>52</u>
<u>3.3.2.2</u>	<u>Estatística Descritiva</u>	<u>55</u>
<u>3.3.2.3</u>	<u>Regressão Linear Múltipla</u>	<u>56</u>
3.3.3	Softwares Utilizados	57
<u>3.3.3.1</u>	<u>IBM® SPSS® Statistics</u>	<u>57</u>
<u>3.3.3.2</u>	<u>Python Spyder IDE</u>	<u>59</u>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62

4.1	Avaliação das Variáveis de Operação da Usina	62
4.2	Dados Coletados e Avaliação.....	66
4.2.1	Observação e Coleta de Dados.....	66
<u>4.2.1.1</u>	<u>Dados Gerais e Equipamentos.....</u>	<u>66</u>
<u>4.2.1.2</u>	<u>Coleta de Dados Supervisório</u>	<u>69</u>
4.2.2	Limpeza e Tratamento de dados	75
4.2.3	Estratificação dos dados	79
4.2.4	Avaliação estatística dos dados coletados	80
<u>4.2.4.1</u>	<u>Dados Equipamentos</u>	<u>81</u>
<u>4.2.4.2</u>	<u>Dados Coletados Supervisório</u>	<u>84</u>
4.3	Estudo teórico	94
4.3.1	Coleta de Informações de projeto sobre a usina	94
4.3.2	Condições teóricas de operação	96
4.4	A relação entre os dados práticos e a teoria	96
4.5	Avaliação das perdas de geração na operação	97
4.6	Desenvolvimento da função matemática para operação	98
4.7	Compilação do modelo para operação.....	102
4.8	Limitações do estudo.....	104
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
5.1	Sobre os Fatores estudados	106
5.1.1	Compilação de dados.....	106
5.1.2	O que interfere na geração operação.....	107
5.2	Proposição de novos estudos.....	107
5.2.1	Para confiabilidade da operação	107
5.2.2	Para aproveitamento energético local	108
	REFERÊNCIAS.....	110
	APÊNDICE A - Programação em Python para Coleta de Dados	122

1 INTRODUÇÃO

A introdução é apresentada em seções com a contextualização, o problema de pesquisa e sua delimitação, os objetivos e por fim, a sua justificativa.

1.1 Contextualização

O tema é apresentado como a avaliação na eficiência da geração de energia elétrica em uma central geradora hidrelétrica (CGH), na cidade de Tibagi, Paraná.

O Brasil, de acordo com os dados do Sistema de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (SIGA, ANEEL 2021), demonstra na base de dados que a principal geração de energia elétrica é através de vias hídricas, com 61,03% da geração elétrica total no Brasil, possuindo o total de 1.374 usinas em operação, entre Central Geradora Hidrelétrica (CGH), com até 5 Megawatts (MW) de potência instalada, Pequena Central Hidrelétrica (PCH), com potência instalada entre 5MW e 30MW, e as Usina Hidrelétrica (UHE), com potência instalada acima de 30MW, sendo que a maior quantidade de usinas hidrelétrica, dá-se pelas CGH's, com um total de 736 usinas instaladas em operação no Brasil, com mais de 844 MW de potência instalada.

Ainda considerando os dados, a Eletrobrás (2018) realizou um estudo indicando que o Brasil possui um potencial hidrelétrico de mais de 246 Gigawatt, onde 107 Gigawatt destes, já estão em operação.

Com as informações citadas, pode-se verificar que o Brasil possui uma base em geração de energia elétrica por meio de hidrelétricas, tendo um grande potencial para ser ampliado e investido. De acordo com o Estudo de Previsão de Demanda de 2021 a 2025, realizado pela Organização Nacional do Sistema Elétrico (ONS), espera-se um aumento no consumo de energia elétrica em 19,98% até 2025, relacionado ao ano de 2021, necessitando assim de investimentos em ampliações, modernizações e novos empreendimentos, mas também, na busca de ter e manter a eficiência energética das usinas já instaladas.

1.2 Problema de pesquisa e sua delimitação

A pergunta que foi respondida através desta pesquisa é: quais fatores mais interferem na eficiência de operação em uma Central Geradora Hidrelétrica (CGH), de Tibagi, Paraná, através dos dados e informações coletadas na usina em estudo, para que a operação se mantenha dentro da eficiência à geração de energia elétrica?

Assim sendo, o problema apresentado é delimitado para usinas hidrelétricas caracterizadas como CGH e de fio de água que estão instaladas e em operação, dentro do campo de avaliação da operação para a produção de energia elétrica.

1.3 Objetivos

Como objetivo principal, têm-se a avaliar a operação da Central Geradora Hidrelétrica (CGH) para a eficiência na geração de energia elétrica de uma central, instalada na cidade de Tibagi, no estado do Paraná.

Como objetivos específicos para sustentar o geral são apresentados:

- 1) Identificar os fatores que mais interferem na eficiência da geração de energia elétrica em uma Central Geradora Hidrelétrica (CGH) de Tibagi no Paraná, através dos dados coletados sobre a operação, relacionando as condições ideais teóricas de projeto com a prática in loco;
- 2) Avaliar as informações da estrutura física existente com seus conjuntos geradores (turbina e gerador) e os dados coletados da usina hidrelétrica estudada;
- 3) Elaborar uma função matemática de avaliação de geração de energia elétrica para apoio à tomada de decisão da operação da usina mantendo a eficiência de produção de energia, de acordo com as variáveis estudadas; e
- 4) Propor novos estudos para a melhoria da confiabilidade de operação e aumento da eficiência energética local da estrutura já instalada da CGH estudada, através dos conhecimentos adquiridos na avaliação e desenvolvimento do modelo de operação.

1.4 Justificativa

Como principal justificativa para a relevância à organização estudada, pode-se verificar que a usina não possui um modelo nem uma avaliação sistêmica de como operar a usina. Atualmente, a CGH dispõe de uma empresa terceirizada externa com operadores remotos para a determinação da geração de energia elétrica, utilizando para a tomada de decisão de como produzir a energia elétrica através da prática dos operadores e experiência da empresa terceira, sendo assim, obtêm-se a necessidade de avaliar as condições para a produção.

Outro ponto na visão da organização é a avaliação de como está e como poderá gerar mais receita por aumento de venda de energia através da melhora de operação através dos custos já disponibilizados e instalados e assim, apoiando o desenvolvimento de um modelo de operação de produção e as propostas de melhorias para então buscar a eficiência energética na operação da produção.

Para a relevância científica, a proposta de apresentar um modelo vinculando a teoria com a aplicação prática apoia nas comprovações do uso das ferramentas e estatística, onde são aplicadas, apoiando em pesquisas no âmbito geral ao redor do tema.

Na relevância acadêmica, os estudos apresentados de Hosseini *et al.* (2005), Santolin *et al.* (2011), Kaldellis *et al.* (2005) e Montanari (2003) sobre o tema de avaliação técnico-econômica no contexto de avaliação da capacidade de instalação se tornam estudo relacionado a processo de novas instalações a serem executadas, sendo que este estudo apresenta melhorar as condições de operação de uma usina já instalada onde já possui as condições ideais teóricas de projeto no investimento, mas não possui ainda um estudo comparativo com a previsão esperada em projeto e as condições reais de operação.

Outro ponto nos estudos em pequenas centrais hidrelétricas, Anagnostopoulos e Papantonis (2007) fazem a avaliação das turbinas, Hosseini *et al.* (2005), Santolin *et al.* (2011) fazem a avaliação de fluxo de água em rios e Kumar *et al.* (2019) fazem estudos de medição de vazão à eficiência. Para este estudo, busca-se avaliar o conjunto da CGH buscando as variáveis do contexto total da usina estudada que mais interferem à organização e não a casos tão específicos, auxiliando assim, em estudos específicos sendo somados para o conjunto total da usina instalada.

E para a relevância social, o aproveitamento energético para a geração de energia condiz ao apoio do cumprimento de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e a disponibilidade de recursos energéticos auxiliando ao desenvolvimento e disponibilidade de energia elétrica com mais eficiência, impactando menos ao meio ambiente na geração de energia elétrica de usinas hidrelétricas já instaladas, licenciadas e em operação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção da monografia é apresentado as pesquisas ao redor do tema. Abrange as pesquisas relacionadas as usinas hidrelétricas dentro da busca por eficiências, para assim, obter o melhor aproveitamento energético relacionando a geração de energia elétrica.

Ao total, são apresentadas 60 referências em torno do tema que envolvem essa temática, sob caracterização de discussão e averiguação pelos pares, de forma a tornar o processo cientificamente formalizado.

Para melhor apreciação, os assuntos avaliados foram separados em duas seções. No item 2.1 são apresentados os temas relacionados a eficiência energética, apresentando em pesquisas a avaliação de usinas hidrelétricas com outras matrizes energéticas como eólica, solar ou irrigação. Entende-se para esta seção que eficiência energética são as atividades que buscam melhorar o uso das fontes de energia, seja ela potencial ou cinética.

No item 2.2 são apresentadas as pesquisas realizadas dentro das geradoras de energia elétrica, ou seja, relacionando diretamente a produção de energia elétrica por usinas hidrelétricas e suas relações com outras áreas. Entende-se para esta seção que eficiência de produção busca a economia dentro das fronteiras de operação da geradora.

No item 2.3 são apresentadas as pesquisas que buscam tanto a eficiência energética quanto a eficiência de produção.

E, por fim, no item 2.4 são apresentadas as revisões que envolvem o tema onde são indicados as melhores práticas, técnicas e inovações revisadas por outros autores, compilados nos artigos apresentados.

Quadro 1: Quantidade de artigos por seção no referencial teórico

Seção Referencial Teórico	Total de Referências
1.1 Eficiência Energética	17
1.2 Eficiência de Produção	35
1.3 Eficiência energética e de produção	3
1.4 Revisões Científicas ao redor do tema	5
Total de Referências	60

Fonte: Autoria Própria

É apresentado no Quadro 1, a quantidade de referências utilizadas para cada seção bem como o total de referências.

2.1 Eficiência Energética

A eficiência energética cada vez mais é demonstrada na busca de processo de redução de custos e desperdícios sobre o conjunto de geradores e sistemas elétricos.

Misiuk *et al.* (2020) apresentam uma pesquisa sobre o aproveitamento energético de pequenos rios na Ucrânia para o desenvolvimento de pequenas geradoras hidrelétricas e demonstram as perspectivas do sistema de aproveitamento de energia do país. Em sua pesquisa é apresentado um alto potencial de pequenos rios na Ucrânia, em 28% do hidro potencial geral. Porém, ao avaliar as condições, baseado nos dados estudados, verifica-se que houve um aumento de potência instalada nas hidrelétricas de pequeno porte ao longo do tempo, mas a geração elétrica não acompanhará, ou seja, mesmo com o aumento de novas instalações, a geração de energia será menor, devido a eficiência do sistema gerador. Estas informações são dadas pelos dados históricos e sua tendência.

A pesquisa de Misiuk *et al.* (2020), afirmam que as pequenas centrais hidrelétricas devem buscar não apenas o aproveitamento do potencial hidrelétrico, mas também implantar princípios de gestão integrada das bacias hidrográficas e assim se tornar um fornecimento completo de energia, para algumas regiões da Ucrânia.

Considerando as condições do sistema de geração híbrida, onde pode-se envolver um ou mais tipos de geradores com a combinação de um ou mais entre eólica, solar e/ou hidráulica (além de outros tipos), Zhang *et al.* (2018) apresentam o estudo na eficiência energética com o objetivo de melhorar a taxa de utilização da rede de transmissão de energia, utilizando a operação complementar eólico-fotovoltaico-hidro onde são realizados as compensações entre os geradores de energia elétrica por usina hidrelétrica, eólica e fotovoltaica e a geração pode ser compensada entre os geradores em si, devido cada gerador ter sua eficiência em seu fator, ou seja, a eólica depende do vento durante o dia, a fotovoltaica da radiação com pico ao meio dia e a hidrelétrica dos recursos hídricos e assim para todos, a condição climática a cada período.

Zhang *et al.* (2018), aplicam em sua pesquisa que a energia fotovoltaica durante o dia compensa a geração eólica e a hidrelétrica poderá complementar na rede de distribuição de energia a geração eólica, estabilizando a geração de energia

durante o dia. Há também outro ponto avaliado, a hidrelétrica depende de momentos de cheia para ter um ótimo rendimento de geração de energia, porém, em momentos de seca este sistema de compensação de solar e eólica pode compensar a seca da hidráulica, permitindo que em momentos do dia em que haverá aumento de produção de fotovoltaica e eólica, pode-se armazenar energia da água para a geração durante a noite e operacionalizar um equilíbrio durante os períodos. Zhang *et al.* (2018), fazem uma avaliação em grande escala, à jusante do rio Yalong, na China, do sistema eólico-fotovoltaico-hidro, avaliando as estações do ano e propondo nos extremos (melhor e pior caso) as condições de operação das geradoras individuais propondo um modelo matemático para minimizar os desperdício de energia na geração de eólico e solar e maximizar o armazenamento de água para a hidrelétrica onde, após a otimização, é obtido um cronograma de operação diário da usina hidrelétrica, melhorando assim a utilização da rede de transmissão com segurança e de maneira estável.

Considerando que são otimizados os reservatórios de água para melhorar a utilização do recurso hídrico, uma pesquisa realizada no Uzbequistão, situado na Ásia Central, Tadzhiiev *et al.* (2012), apresentam a necessidade de eficiência energética devido à volatilidade dos rios e a necessidade de irrigações para recuperação de terras. A pesquisa avalia as condições de vento para geração de eólica para melhorar a eficiência dos reservatórios de hidrelétrica para irrigações em tempos de necessidade de irrigação e reforça assim, a necessidade de complementar a geração de energia elétrica através de meios híbridos para que, neste caso, possam utilizar a reserva de recursos hídricos.

Li *et al.* (2020), realizam o estudo na mesma abordagem, verificando em sua pesquisa a integração da geração eólica com o sistema hidrelétrico de grande armazenamento, na busca de investigar a eficiência dos sistemas híbridos com benefício econômico onde ajuda na otimização de operação e redução dos desperdícios de energia do sistema, idealizando em seu artigo que no processo de geração é necessário o ajuste rápido de operação da usina hidrelétrica sobre as flutuações da eólica. No artigo é apresentado um modelo de simulação para análise de eficiência do sistema hidro-eólico, com pouca dependência de volume de dados, gerando também uma avaliação do sistema híbrido com base em benefícios econômicos e fornece recomendações aos formuladores de políticas para os preços associados à indústria de energia.

Yang *et al.* (2020), desenvolvem um modelo para que a energia hidrelétrica supra as flutuações da energia eólica concluindo com seu modelo que a usina hidrelétrica, com base na distribuição por geração eólica, é adaptável e uma pequena mudança no consumo de água pode gerar uma grande mudança no sistema. O modelo apresentado, apontam os autores, que pode garantir a segurança para a operação real das usinas hidrelétricas reduzindo os picos do sistema híbridos bem como apoiar para a decisão ideal deste sistema.

Outra pesquisa realizada por Tadjiev *et al.* (2019), avaliam sistemas híbridos entre hidrelétrica e eólica, verificando que em alguns momentos há a necessidade de controle da flutuação da geração de energia. Devido a necessidade dos rios possuírem um bom aproveitamento energético da geração de energia hidrelétrica e o consumo de águas dos canais, em relação a eólica, esta última melhora a produção estabilizando as flutuações do conjunto energético.

Quanto a relação entre a geração de energia elétrica fotovoltaica com hídrica, Rosa-Clot e Tina (2019), demonstram em sua pesquisa através de uma macro avaliação de um sistema híbrido entre a hidrelétrica com geradora flutuante fotovoltaico em seus reservatórios, as seguintes vantagens deste sistema híbrido:

- 1) Ligação da rede pois como as usinas hidrelétrica já possuem estrutura interligada à rede de distribuição de energia, uma geradora fotovoltaica instalada ao mesmo local, reduziria os seus custos de operação e instalação;
- 2) a redução de flutuação de geração de energia elétrica para a rede, onde que, em momento de seca para a hídrica, pode-se deixar durante o dia gerando por fotovoltaica e armazenando água no reservatório e durante a noite produzir pela hídrica;
- 3) sem a ocupação de terras, considerando as usinas solares instaladas em flutuação no reservatório;
- 4) pela fotovoltaica não ser de instalações fixas, podem ser instaladas ou removidas facilmente do local;
- 5) economia com a redução da evaporação da água dos reservatórios (dependente da região e das condições climáticas) e qualidade de água contendo a proliferação de algas;
- 6) resfriamento das placas solares, dando rendimento de 10% de produção a mais durante o ano; e

- 7) gera um balanço de radiação pois as plantas flutuantes possuem um coeficiente de reflexão menor que 5%, em comparação com a 20-30% em telhados, pois se o coeficiente de reflexão for muito alto, estes podem gerar mudanças climáticas locais devido à grande área de instalação das usinas fotovoltaicas.

Para algoritmos aplicados a sistemas híbridos, Gonçalves *et al.* (2011) desenvolvem um modelo com redes neurais artificiais integrado para planejamento e decisão de soluções energéticas híbridas sustentáveis, permitindo a melhoria de eficiência energética global.

Já em um sistema hidrotérmico, Werner e Verstege (1999) buscam resolver o problema de operação entre estes dois sistemas com o planejamento de curto prazo determinando os melhores horários, através de estratégias de evolução numérico computacional, para a geração de usinas hidrelétricas e termelétricas. Demonstram que os experimentos com métodos numéricos em sistemas hidrotérmicos possuem a capacidade resolver o problema proposto; qual é o melhor momento de operação entre o sistema hidrotérmico.

Como grande parte das pequenas usinas hidrelétricas são integradas a redes urbanas de água para consumo, Algieri *et al.* (2020) verificam que muitas vezes as redes de água são pressurizadas e possuem um potencial hidrelétrico, que muitas vezes suas pressões são reduzidas por válvulas, não sendo aproveitada a sua energia para a geração de energia elétrica. Neste estudo, mostram que as pequenas geradoras hidrelétricas podem ser integradas a sistema de irrigação coletivo, utilizando um equipamento do tipo bomba podendo ser usado também como turbina e assim os recursos hídricos são suficientes para gerar energia elétrica a um custo muito menor do que usina pré-determinadas a serem somente geradoras.

Outro estudo que busca otimizar a rede de distribuição de água, Rossi *et al.* (2016) explicitam a discussão sobre a tecnologia de bomba como turbina (PaT) aplicado a recuperação de energia onde estes equipamentos podem ser instalados em redes de distribuição de água para o ajuste de pressão e produção de energia elétrica. É realizada uma investigação de desempenho no modo bomba e turbina em laboratório, com o uso de seu potencial para recuperação energética e assim, foi aplicado a um estudo de caso para avaliar a viabilidade econômica para este tipo de equipamento.

Aplicado a redes de irrigação, Chacón *et al.* (2020) apresentam uma metodologia para quantificar o potencial de recuperação energética de redes de irrigação pressurizadas, onde não possui dados de vazão ou pressão, sendo que suas conclusões são apresentadas como satisfatórias para o conceito de micro energia hidrelétrica, utilizando bomba como turbina a estas redes, validando um modelo de eficiência energética entre geração e sistema de irrigação pressurizado.

Em busca de recuperação de energia perdidas em válvulas redutoras de pressão em redes de abastecimento de água, Vagnoni *et al.* (2018), realizam a avaliação de desempenho hidráulico de microturbinas para esta aplicação, fornecendo uma solução para calcular este desempenho.

Outro ponto avaliado por Sun *et al.* (2019) apresentam que como é visto em outros estudos a ineficiência de usinas hidrelétricas de baixa queda, este artigo apresenta outro meio de buscar a eficiência energética onde usinas hidrelétricas que possuem bombas automáticas podem converter a energia de baixa queda de água em energia de gás de alta pressão. Este sistema de gás de pressão pode ser utilizado para bombear água em locais montanhosos até centenas de metros de altura sob a condição de queda no rio de 2 e 10 metros. Este estudo busca melhorar a eficiência deste sistema devido as ineficiências apresentadas em outros estudos das usinas hidrelétricas de baixa queda gerando economia energética para consumo de água em regiões de vale e montanha.

Já na África do Sul, Niebuhr *et al.* (2019) demonstram um estudo para utilização de canais aberto (onde é direcionado a água para as geradoras ou desvios de rios), aplicando turbinas submersas, chamadas de *hydrokinetic* (HK), aproveitando o fluxo de água (hidro cinética) destes canais para aproveitamento energético. A pesquisa desenvolve um modelo para implantação em conjunto com o sistema de canais e faz uma aplicação no canal de Boegoeberg, na África do Sul, realizando a instalação de turbinas HK, auxiliando na implantação e estudos de novas geradoras dados suporte nos estudos para o desenvolvimento de novos canais, simplificando as incertezas.

Em contrapartida aos benefícios citados, Mayor *et al.* (2017) apresentam em sua pesquisa que a soma de todas as usinas hidrelétricas de pequeno porte, avaliadas em seu estudo, apesar de fornecer uma alternativa de explorar o potencial hidráulico sustentável, pode cumulativamente superar os impactos gerados em alguns projetos de grande escala pois os projetos de pequeno porte são avaliados

individualmente e não no efeito gerado pelo sistema como um todo, das pequenas hidrelétricas em cascata. Mayor *et al.* (2017), citam que, pode ser realizado ações para que haja a redução nos impactos cumulativos em busca de maximizar o valor econômico e de sustentabilidade dos projetos, buscando mais qualidade com maior valor e benefícios que as usinas de pequeno porte podem gerar.

Peters *et al.* (2021), seguindo a mesma linha, discorrem um estudo sobre o planejamento hidrelétrico sustentável em uma bacia hidrográfica na Grécia, avaliando que, apesar das hidrelétricas serem uma energia renovável, muitas delas estão sendo construídas por meio de barragens, onde impactam no funcionamento do ecossistema de água doce além dos impactos ecológicos, sociais, de segurança e saúde e ainda, de interesse e conflitos políticos. Ressalta ainda que, apesar das pequenas geradoras hidrelétrica gerarem maior velocidade de implantação, existe regulamentações nacionais que estão subestimando os impactos ecológicos, sociais e econômicos, restringindo assim o desenvolvimento sustentável. Assim, a pesquisa gera recomendações para os tomadores de decisão para a implantação de usinas de pequeno porte.

Quadro 2: Combinações dos temas por referência, seção 2.1

Tema principal	Combinação ao tema	Autores
Eficiência energética em conjunto Híbrido	Hidrelétrica, Fotovoltaica e Eólica	Zhang <i>et al.</i> (2018)
	Hidrelétrica e Eólica	Tadzhiev <i>et al.</i> (2012), Li <i>et al.</i> (2020), Yang <i>et al.</i> (2020), Tadjiev <i>et al.</i> (2019)
	Hidrelétrica e Fotovoltaica	Rosa-Clot e Tina <i>et al.</i> (2019)
	Hidrelétrica e Térmica	Werner e Verstege (1999)
	Algoritmo de Otimização	Gonçalves <i>et al.</i> (2011)
Eficiência Energética no Potencial Hidrelétrico	Usina Hidrelétrica e Redes de Distribuição de água	Tadjiev <i>et al.</i> (2019), Algieri <i>et al.</i> (2020), Rossi <i>et al.</i> (2016), Vagnoni <i>et al.</i> (2018), Sun <i>et al.</i> (2019)
	Reservatórios de água	Tadzhiev <i>et al.</i> (2012), Li <i>et al.</i> (2020), Rosa-Clot e Tina <i>et al.</i> (2019)
	Gestão Integrada de Bacias Hidrográficas	Misiuk <i>et al.</i> (2020)
	Usina Hidrelétrica e Irrigação	Chacón <i>et al.</i> (2020)
	Usina Hidrelétrica com uso de energia Potencial e Cinética	Niebuhr <i>et al.</i> (2019)
Sustentabilidade	Usinas Hidrelétricas	Mayor <i>et al.</i> (2017), Peters <i>et al.</i> (2021)
	Bacia Hidrográficas	Peters <i>et al.</i> (2021)

Fonte: Autoria Própria

Ao finalizar esta seção, o Quadro 2 apresentam os autores referenciados por tema principal e a sua combinação ao tema, facilitando a visualização dos temas apresentados nesta seção.

2.2 Eficiência de Produção

Após a avaliação da busca da eficiência energética, onde é considerado o aproveitamento do sistema energético como um todo, esta seção apresenta a busca pela eficiência dentro da produção hidrelétrica, envolvendo desde modelo matemáticos, avaliação de equipamentos até a operação em si. Esta seção é separada por subtópicos para melhor agrupamentos dos conceitos já estudados.

Quadro 3: Quantidade de referências subtópicos da seção 2.2

Subtópicos da seção 1.2	Total de Referências
1.2.1 Planejamento de capacidade e desempenho	12
1.2.2 Operação	6
1.2.3 Algoritmos e Otimizações	12
1.2.4 Equipamentos	5

Fonte: Autoria Própria

Ao total desta seção foram utilizadas 35 referências. Para facilitar a visualização, o Quadro 3 apresenta os subtópicos apresentados nesta seção bem como a quantidade de referências para cada.

2.2.1 Planejamento de capacidade e desempenho

Ao considerar que as hidrelétricas são necessárias para a malha energética, com os benefícios de ser uma energia renovável, há diversos estudos apoiando o planejamento de capacidade e busca no desempenho.

Hosseini *et al.* (2005) desenvolvem um estudo para o planejamento de pequenas usinas hidrelétricas, determinando a capacidade de instalação ideal baseada em informações técnicas, econômicas e de confiabilidade por meio de estatística categorizadas de duração de fluxo de água em rios, em diferentes meses, considerando as receitas e custos do investimento e cálculos de confiabilidade, gerado através do método de Monte Carlo. É realizada uma pesquisa na pequena central hidrelétrica Nari, no Irã, para o estudo de caso e determinação da capacidade ótima de instalação. Assim com a avaliação, obtém-se um compromisso entre os índices técnicos, econômicos e de confiabilidade, apresentando a capacidade de instalação de potência ideal a ser instalada.

Santolin *et al.* (2011) apresentam uma pesquisa para o dimensionamento da capacidade de uma pequena central hidrelétrica a partir de dados do curso de duração de escoamento (fluxo de água), com base de avaliação em técnico-econômico. Considera-se que para o seu dimensionamento a avaliação do tipo e dimensões da turbina, produção anual de energia, altura máxima para evitar cavitação, custo de máquina, valor presente líquido e taxa interna de retorno. Foram estudados, para validar a eficácia do método, três locais e a sua disponibilidade de vazão local.

Devido ao aumento de solicitações de pequenas centrais hidrelétrica na Grécia, Kaldellis *et al.* (2005), investigam em sua pesquisa a sistemática da viabilidade técnico-econômica de centrais hidrelétricas. É realizada uma análise de sensibilidade do mercado local, o fator de capacidade de instalação, a taxa de escalamento do preço de energia local e o custo de primeira instalação.

Montanari (2003) desenvolve outro método de avaliação, para encontrar a opção economicamente viável para a instalação de micro usinas hidrelétricas. Com foco em usinas de baixa queda e baixa vazão, utilizando turbinas dos tipos hélice e turbina *Michell-Banki*, onde que o baixo custo de instalação são retornados com a exploração parcial do recurso disponível, sendo que estas possuem flexibilidade de operação. Faz uma avaliação entre os dois tipos de turbina e gera condições de avaliação facilitada para a escolha do tipo de turbina para cada tipos de planta a ser instalada.

Karlis e Papadopoulos (2000) desenvolvem um programa de computador para a avaliação preliminar de instalação de pequenas centrais hidrelétrica informando condições técnicas e financeiras para justificar novos investimentos. O *software* é aplicado a uma planta grega, para fins de ilustração. O *software* pode fornecer dados mais precisos e confiáveis se possuir dados hidrológicos históricos disponíveis.

Já Voros *et al.* (2000) buscam na avaliação do projeto de uma usina hidrelétrica os benefícios econômicos do investimento, levando em consideração para o modelo matemático o seu desempenho em relação à construção e operação buscando maximizar a eficiência investimento através de modelo empírico da eficiência da turbina.

Ao implantar um novo planejamento de usina hidrelétrica, um dos pontos que é verificado por Niadas e Mentzelopoulos (2007) apresentando uma abordagem probabilística para quantificar a incerteza que influencia o projeto e suas expectativas econômicas, considerando as incertezas hidrológicas para o planejamento.

Para a previsão de vazão de água para estimar a capacidade de mini hidrelétrica Peña *et al.* (2009) apontam um método clássico e descreve um conjunto de metodologias para avaliar e determinar a capacidade de geração de uma mini hidrelétrica. Utilizando séries temporais, a metodologia de previsão é para prever o comportamento da água em dado rio onde a mini hidrelétrica será estudada para

instalação. É realizado treinamento de redes neurais e, com isto, é previsto a vazão de água projetada. Complementando a pesquisa, é fornecida uma seleção de hidromecânicos importantes aplicados a novos projetos de mini hidrelétricas.

Na busca da avaliação do desempenho de pequenas usinas hidrelétricas, Anagnostopoulos e Papantonis (2007), fazem uma avaliação numérica para a condição de duas turbinas operando em paralelo, que podem diferir de capacidades. Justificam que estas diferenças de capacidade das turbinas em paralelo podem aumentar a produção de energia e melhorar os resultados econômicos do investimento. Ao calcular a capacidade da turbina é posto em evidência os condutos forçados, onde apontam que gera grande impacto na viabilidade técnica e econômica. A conclusão da pesquisa é que mesmo com um custo um pouco a mais na construção, verifica-se que os melhores resultados de capacidade estão na faixa entre a razão de 0,4 a 0,5 (razão esta da capacidade do tamanho entre as turbinas instalada em paralelo, sem unidade).

Buscando ainda o desempenho da usina, Kumar *et al.* (2019), realizam uma avaliação de desempenho nas pequenas centrais hidrelétricas, apresentando testes de eficiência envolvendo a medição do valor absoluto da descarga por meio da turbina, a queda de água disponível na turbina e a saída de energia elétrica da máquina. As medições são realizadas em canais de água aberto e fechados (condutos forçados). Discute-se no estudo os métodos de medições de vazão aplicado aos testes eficiência do local.

No desempenho de uma usina hidrelétrica, com os anos ocorrem os desgastes e excesso de manutenção gerando ineficiências em acordo com as mudanças de tecnologia, Ivanchenko e Platov (1990), fazem uma avaliação que dada mudanças na vazão de diversas alterações no fluxo de água que ocorreu em uma usina hidrelétrica que tinha mais de 50 anos em operação e assim concluíram a necessidade de reconstruir as turbinas onde possuem índices de confiabilidade baixo e perdas de eficiências de operação devido a desgastes e obsolescências. Devido também às condições do fluxo de água, deve ser redimensionado entre potência e velocidade das turbinas para melhor desempenho da planta.

Por fim, Guzmán *et al.* (2019), realizam um estudo de caso em um local de baixa queda com um sistema hidrelétrico de turbina tipo vórtice gravitacional, comparando com outras tecnologias maduras de baixa queda, relatando desde o projeto, modelagem, construção até o teste da planta. Conclui em seu trabalho o

detalhamento do projeto e comprovando o uso em baixas quedas e vazões e podendo ser construindo com um alto nível de mão de obra manual e com materiais e tecnologias acessíveis em um país em desenvolvimento.

Quadro 4: Combinações dos temas por referência, subtópico 2.2.1

Tema principal	Combinação ao tema	Autores
Avaliação Técnico-Econômica	Capacidade de Instalação Ideal	Hosseini <i>et al.</i> (2005), Santolin <i>et al.</i> (2011), Kaldellis <i>et al.</i> (2005), Montanari (2003)
	Software de Avaliação	Karlis e Papadopoulos (2000)
	Benefícios Econômicos	Voros <i>et al.</i> (2000)
	Planejamento de instalação de hidrelétricas	Niadas e Mentzelopoulos (2007)
Pequena Centrais Hidrelétricas	Avaliação de fluxo de água em rios	Hosseini <i>et al.</i> (2005), Santolin <i>et al.</i> (2011)
	Avaliação de Turbinas em Paralelo	Anagnostopoulos e Papantonis (2007)
	Medições de vazão à eficiência	Kumar <i>et al.</i> (2019)
	Reavaliação das condições operacionais	Ivanchenko e Platov (1990)
Micro Hidrelétrica	Baixa queda e de vazão de água	Montanari (2003), Guzmán <i>et al.</i> (2019)
	Estimar capacidade	Peña <i>et al.</i> (2009)

Fonte: Autoria Própria

Ao finalizar este subtópico, no Quadro 4 são apresentados os autores referenciados por tema principal e a sua combinação ao tema, facilitando a visualização dos temas apresentados neste subtópico.

2.2.2 Operação

Planejada e implantada, a usina hidrelétrica deve possuir operação de acordo com os requisitos aplicados em projeto e na busca incessante de melhorias dentro da melhor operação para a maior eficiência dentro da planta. Stitt e Matuszczak (1991) realizam uma aplicação para a melhoria de eficiência da planta implantando um sistema de controle na usina hidrelétrica Hoover, nos Estados Unidos. A implantação trouxe um aumento de eficiência na produção de energia em média de 4,5% através de liberação de água para geração de energia com o controle das medições de curvas de fluxo de água e medição de geração, fazendo comparações com medidores de vazão nas saídas das comportas principais.

Com base em planejamento de operação de curtíssimo prazo, que busca prever o dia seguinte de operação, Abritta *et al.* (2020) fazem uma avaliação do derramamento de água pelas barragens, acionadas pelos operadores. O estudo não pretende mudar a metodologia de curto prazo, mas indicar a problemática para que os investigadores identifiquem mais rapidamente as causas indesejáveis. A causa de fazer este derramamento de água pelas barragens, pode ser muitas vezes baseado em perdas de potência, onde é necessário reduzir a queda aumentando a vazão de água das turbinas.

Para a determinação da curva de projeto operacional ótima, Borkowski e Majdak (2020), descrevem que isto é problemático pois dependem do sistema hidráulico, que dependem de muitos parâmetros e podem mudar durante a operação, principalmente em baixas quedas. O estudo, propõe o uso de fórmula analítica baseada em dimensões geométricas da turbina, podendo identificar a curva de desempenho e comparar a operação com velocidade de rotação constante com a de velocidade variável, onde esta última teve uma produção anual de energia de 16% maior, para os dados do artigo.

Ao avaliar o controle de níveis de água em sistema de cascata de usinas hidrelétrica, Join *et al.* (2010) apresentam um novo conceito de controle de nível de água aplicado a uma usina, garantindo um bom desempenho de rastreamento de trajetória do fluxo de água, mesmo em condições operacionais severas implicando uma redução dos testes de comissionamento e manutenção mais fácil, sendo que pode ser aplicada a qualquer usina hidrelétrica e para questões de irrigação.

Quanto ao controle automático de produção, Shen *et al.* (2020) apresentam que este sistema de controle automático é de vital importância para a segurança e estabilidade do sistema de geração em tempo real, atendendo os requisitos econômicos e de segurança, simultaneamente, sendo que este deve cumprir todo o processo em um tempo muito curto, sendo assim um desafio na operação e controle de usinas. As características que dificultam a unidade ideal e a distribuição de carga de uma usina está relacionado a queda de água, descarga de energia e, às vezes, ao derramamento de água e além do mais, a faixa de operação é caracterizada por zonas restritas e proibidas onde as usinas hidrelétricas geralmente possuem uma baixa eficiência, como cita, por exemplo a cavitação ou vibração mecânica, sendo assim um limite para as turbinas que variam com a queda. Assim sendo, estes limites são dificuldades encontradas para o controle de produção automático. Este

estudo desenvolve uma metodologia que resolve estas restrições com o controle de produção.

Ao fazer um estudo entre o sistema de gestão de água e operação de uma usina de grande porte em cascata, Osipchuk *et al.* (2020) analisam a operação da usina de acordo com a eficiência de operação e confiabilidade do sistema de águas. Devido a problemas de atendimento de usuários de água e setores da economia, principalmente em momentos de seca, é realizada a busca do uso eficiente operacional do reservatório hídrico aumentando assim a disponibilidade de recursos hídricos para usuário e consumidores de água.

Quadro 5: Combinações dos temas por referência, subtópico 2.2.2

Tema principal	Combinação ao tema	Autores
Melhoria de Eficiência	Sistema de controle	Stitt e Matuszczak (1991)
	Curva de projeto operacional ótima	Borkowski e Majdak (2020),
	Controle automático de operação	Shen <i>et al.</i> (2020)
	Sistema de gestão de águas	Osipchuk <i>et al.</i> (2020)
Planejamento de Operação	De curto prazo	Abritta <i>et al.</i> (2020)
	Controle de níveis de água	Join <i>et al.</i> (2010)

Fonte: Autoria Própria

Ao finalizar este subtópico, no Quadro 5 são apresentados os autores referenciados por tema principal e a sua combinação ao tema, facilitando a visualização dos temas apresentados neste subtópico.

2.2.3 Algoritmos e Otimizações

Nos estudos e pesquisas relacionadas a hidrelétrica, vê-se com clareza a grande dificuldade de previsões com confiabilidade, devido as condições aleatórias e a sistemas não lineares. Assim, a busca por modelos e algoritmos são excessivas para a tomada de decisão de maneira mais próxima da realidade e confiável.

Ao utilizar dados, um dos pontos verificados é a qualidade dos dados para a avaliação. Hidalgo *et al.* (2010), apresentam em seu estudo uma sequência de procedimentos que visam comprovar a qualidade e ajustes de dados de usinas hidrelétrica e apresenta ao final, o impacto dos dados para modelos de planejamento de operação no uso de dados neste setor brasileiro.

Outro ponto avaliado é a imprecisão do erro de previsão para que possa orientar a operação real de uma usina hidrelétrica onde Jiang *et al.* (2019), citam em seu estudo essa necessidade.

Em 2002, Arce *et al.* (2002) apresentaram em sua pesquisa um ganho financeiro de 80 milhões de dólares por ano na usina de Itaipu, no Brasil, através da busca da eficiência de produção por meio de uma programação dinâmica para otimizar a operação das geradoras de forma mais econômica pelo meio de *trade-offs* entre *start-up* e *shut-down* das turbinas geradoras levando em consideração as variações do canal de escape, perda de cargas em comportas e a eficiência do gerador da turbina. O artigo apresenta que os custos estão envolvidos com a manutenção e tempo de serviços das unidades geradoras, estimando um custo por megawatt de potência instalada por cada processo de *start-up* e *shut-down*.

Já Yang *et al.* (2020), ao determinar que a distribuição de carga na turbina esteja configurada de maneira econômica (chamado de ELD), investigam a alocação eficiente da produção para suprir a demanda de energia hidrelétrica com o consumo mínimo de água e o compromisso de unidade (chamado de UC) e assim minimiza o consumo total de água de acordo com o *start-up* e *shut-down* das unidades geradoras hidrelétricas. Assim, o ELD e UC economizam no custo de operação, aumentando a eficiência da turbina com maior tempo de vida útil. É dada uma resolução para uma usina de grande porte da operação econômica curto prazo, usando modelo de nuvem normal caótica baseado no algoritmo salto de sapo embaralhado discreto.

E Zhang *et al.* (2018) apresentam seu estudo justificando que, em uma hidrelétrica, existem mudanças drásticas no fluxo, na velocidade de rotação e quedas de água, tornando o sistema hidro e turbina instável e inseguro. Este processo transitório inclui de pequenas a grandes oscilações. O estudo enfatiza no processo de abertura das pás da turbina no momento de *start-up*, desenvolvendo um novo método de cluster de superfície neste momento de transição entre hidro e turbina, na condição de *start-up*.

Chuangang *et al.* (2016) desenvolvem uma programação dinâmica aplicada a resolver problemas de otimização da operação de reservatório de água propondo uma função de saída de estação hidrelétrica, onde chama de HSOF, reduzindo assim a complexidade da programação dinâmica. Esta programação visa a

otimização de operação de reservatórios de água e nesta pesquisa realiza as comparações de programação em usina hidrelétrica.

Para a resolução de problemas complexos, em sua pesquisa Chen *et al.* (2021) dissertam sobre um algoritmo chamado de lobo cinzento, para aplicação em otimização de geração de energia de reservatório utilizando como restrições o nível de água, quantidade de água e saída de água da estação hidrelétrica, fluxo de geração por período e o escoamento de entrada onde em sua conclusão o uso do algoritmo possui resultados satisfatórios.

No Brasil, Stefenon *et al.* (2021) apresentam um programa de operação diária de uma usina brasileira, prevendo atender as necessidades contratuais, demanda de geração prevista para o momento, mas principalmente, o conjunto de prevenção de emergência em usinas hidrelétricas com barragem. É utilizado modelos de aprendizado computacional tendo esses métodos resultados promissores para a previsão de séries temporais prevendo uma emergência de acordo com o nível da barragem, como análise preventiva e garantindo a segurança, podendo assim alertar equipe específicas em uma situação adversa.

Hammid e Sulaiman (2017), desenvolvem uma programação ideal para geração de uma hidrelétrica a longo prazo usando um algoritmo meta-heurístico, em uma barragem, tendo como objetivo de criar uma solução eficaz para o problema de otimização de energia bem como para os problemas operacionais da barragem. A análise do conjunto dos dados verificou que foi diretamente influenciada pela queda líquida da turbina e pela taxa de fluxo de água, considerando os dados de saída como a geração de energia.

No apoio à eficiência de operação de usinas hidrelétrica *run-of-river*, ou fio de água, Dumur *et al.* (2001) através de identificação por meio de medições disponíveis e um sistema de controle de nível de água local, resulta sua pesquisa em uma metodologia para a operação com resultados comprovados na aplicação experimental.

Perez-Díaz e Fraile-Ardanuy (2008), desenvolvem uma usina experimental *run-of-river* para a aplicação de redes neurais aplicadas a velocidade da turbina de fluxo axial e a posição das pás da turbina simulando o comportamento da eficiência da turbina. Outra rede neural é desenvolvida para rastrear a eficiência máxima de posição ideal das pás da turbina por meio de treinamento obtidos em medições de campo coletadas em uma bancada de teste. Ao final, é encontrado aumentos

significativos na eficiência das turbinas aplicando a rede neural artificial de acordo com a operação.

Avaliando as condições de cargas entre turbinas no mesmo sistema, Bortoni *et al.* (2007) desenvolvem uma ferramenta através de otimização combinatória para obter uma estratégia de distribuição de carga entre as unidades geradoras, sem nenhuma informação anterior sobre eficiência necessária.

E por fim, Nikolić *et al.* (2021) realizam uma pesquisa voltada para revitalização de bacias de sedimentação, antecessor à casa de força onde encontram as turbinas para geração de energia. Para a revitalização é utilizado um software computacional para a busca de resultados numéricos para a investigação e revitalização do sistema de sedimentação. Apresentou que o desafio é utilizar o *software* de simulação numérica em paralelo com um modelo analítico mais simples que ajude a agilizar a busca de soluções.

Quadro 6: Combinações dos temas por referência, subtópico 2.2.3

Tema principal	Combinação ao tema	Autores
Planejamento de Desempenho	Qualidade dos Dados	Hidalgo <i>et al.</i> (2010)
	Imprecisão de dados para previsão	Jiang <i>et al.</i> (2019)
	Programação diária	Stefenon <i>et al.</i> (2021)
	Programação de longo prazo	Hammid e Sulaiman (2017)
	Revitalização de bacias de sedimentação	Nikolić <i>et al.</i> (2021)
Otimização de Operação	Programação dinâmica	Arce <i>et al.</i> (2002), Chuangang <i>et al.</i> (2016)
	Consumo total de água de reservatórios	Yang <i>et al.</i> (2020)
	Transição de fluxo entre hidro e turbinas	Zhang <i>et al.</i> (2018)
	Problemas complexos	Chen <i>et al.</i> (2021)
	Sistema de controle de nível de água	Dumur <i>et al.</i> (2001)
	Redes Neurais	Perez-Díaz e Fraile-Ardanuy (2008)
	Unidades geradoras	Bortoni <i>et al.</i> (2007)

Fonte: Autoria Própria

Ao finalizar este subtópico, no Quadro 6 são apresentados os autores referenciados por tema principal e a sua combinação ao tema, facilitando a visualização dos temas apresentados neste subtópico.

2.2.4 Equipamentos

Dentro da geração de energia há intensamente a necessidade de possuir equipamentos dimensionados às condições de cada planta. A busca incessante de novas tecnologias com alta eficiência para a geração hidrelétricas são claras e necessárias.

Avaliando o carregamento de pressão nas turbinas, Trivedi *et al.* (2017) realizam uma investigação deste carregamento em uma turbina tipo Francis, pois como estas possuem altas eficiências a demandas mais altas, chamada de ponto de projeto, porém, ao possuir baixas demandas são condicionadas a trabalhar abaixo do ponto de projeto acarretando a eficiência de geração, gerando até problemas de confiabilidade de equipamentos e quebras. Assim, os autores avaliam como alternativa novas configurações de operação (velocidade variável) para a estabilidade das turbinas, permitindo para a flexibilidade, de velocidade de rotação e de descarga, uma gama de potências de saída na sua geração. Esta aplicação do caso estudado pode ser visto em turbinas de retrofit ou em turbinas novas. Possui algumas descobertas e sugestões de trabalhos futuros, porém promissor para a investigação em busca de eficiência de produção de energia para locais que tenha variações de demanda.

Nesta flexibilização da turbina em termos de variação de velocidade, Guo *et al.* (2018), realiza uma revisão e resultados experimentais relacionados a operações de velocidade variável onde justificam que pode ganhar mais potência hidráulica em relação a velocidade variável e melhorar o processo de operação, para aplicações em micro hidrelétricas. Afirma que a eficiência depende muito das condições geométricas de projeto e de condições de operação, que são complexas. É apresentado uma modelagem baseada em medições *hill charts* e um *benchmark* validado de operação a velocidade variável.

Em estudos de microturbinas, Druzhinin *et al.* (2019), apresentam em sua pesquisa uma melhoria nas microturbinas com base em tecnologias de imitação da

natureza. No estudo é verificado que houve um aumento de 20% de eficiência de produção nas microturbinas bem como a eficácia das abordagens utilizadas no projeto.

Leguizamón e Avellan (2020), apresentam em seu estudo as turbinas de fluxo cruzado que possui atratividade em geração hidrelétrica de pequena escala e são atrativas devido ao seu baixo custo, permitindo boa eficiência em condições fora de projeto. É realizado um estudo paramétrico evidenciando que mesmo que os coeficientes sugeridos resultem em boas eficiências no geral, deve-se mais pesquisas necessárias para este tema.

Nishi *et al.* (2020), em seu estudo é realizado a avaliação de uma turbina com rotor tipo vórtice, avaliando as perdas e considerando as mudanças de operação para a eficiência de produção de energia através deste tipo de rotor, alterando as taxas de fluxo. É proposto um método de análise de perdas baseado nos resultados avaliando quantitativamente as perdas hidráulicas da turbina.

Quadro 7: Combinações dos temas por referência, subtópico 2.2.4

Tema principal	Combinação ao tema	Autores
Turbina	Carregamento de Pressão	Trivedi <i>et al.</i> (2017)
	Velocidade Variável	Guo <i>et al.</i> (2018)
	Fluxo Cruzado	Leguizamón e Avellan (2020)
	Taxa de Fluxo	Nishi <i>et al.</i> (2020)
Microturbina	Tecnologia por imitação da natureza	Druzhinin <i>et al.</i> (2019)

Fonte: Autoria Própria

Ao finalizar este subtópico, no Quadro 7 são apresentados os autores referenciados por tema principal e a sua combinação ao tema, facilitando a visualização dos temas apresentados neste subtópico.

2.3 Eficiência energética e de produção

Considerando casos de usinas hidrelétricas de pequeno porte que operem em casos combinados, Karamarković *et al.* (2018) fazem uma avaliação configuração de produção e busca a melhor eficiência energética para o sistema, para a vazão inferior mínima, onde o fornecedor garante a turbina, propondo três possibilidades para aumento da produção de energia no sistema combinado. Para a

melhor produção é proposto a instalação de mais uma turbina com pequena capacidade aumentando o grau de eficiência do sistema. Ao final, foi realizado uma otimização técnico-econômica das turbinas.

Já no sistema híbrido entre fotovoltaica e hidrelétrica, Ming *et al.* (2018), discorrem em seu estudo que a geração por hídrica pode complementar a geração por radiação devido ao sistema solar possuir várias incertezas em sua geração. Este artigo apresenta a busca da eficiência energética através das melhorias das diretrizes de operação de usinas hidrelétrica de grande escala. Este modelo apresentado busca soluções para minimizar o consumo de água quando as demandas de cargas são solicitadas. Como uma de suas conclusões, quanto melhor as previsões de geração fotovoltaica menor será o consumo de água.

Ao avaliar a rede elétrica e o sistema de geração hídrica em cascata da China, Shen *et al.* (2019) avaliam as muitas restrições de tempo e espaço acopladas a diferentes demandas de energia que são gerados pela operação do sistema hidrelétrico real e que definem ser uma tarefa desafiadora e de grande complexidade a operação ideal deste sistema em cascata. Neste estudo é desenvolvido um modelo de otimização para maximizar a potência mínima das redes elétricas, considerando como restrições a segurança da rede, contratos de eletricidade e as limitações de operação em nível de água, energia e descarga.

Quadro 8: Combinações dos temas por referência, seção 2.3

Tema principal	Combinação ao tema	Autores
Hidrelétricas	Sistema de combinação	Karamarković <i>et al.</i> (2018)
Fotovoltaica e Hidrelétrica	Complementação de geração	Ming <i>et al.</i> (2018)
Rede Elétrica e geração hídrica	Operação para diferentes demandas	Shen <i>et al.</i> (2019)

Fonte: Autoria Própria

Ao finalizar esta seção, no Quadro 8 são apresentados os autores referenciados por tema principal e a sua combinação ao tema, facilitando a visualização dos temas apresentados nesta seção.

2.4 Revisões Científicas ao redor do tema

Mishra *et al.* (2015) apresentam uma revisão abrangente da situação e desenvolvimento de pequenas centrais hidrelétrica na Índia e desenvolve cenários de crescimento. Demonstra uma visão geral do potencial energético e a capacidade instalada considerando o status tecnológico, apoio político e regulatório, estágio de desenvolvimento de uma pequena usina e as barreiras de desenvolvimento na Índia e assim, desenvolvem um modelo com conceituação do cenário discutindo, simulando e analisando os resultados gerados pela pesquisa.

Na busca de tecnologias emergentes no setor hidrelétrico, Kougias *et al.* (2019), fazem uma revisão com a análise das (i) atividades recentes de pesquisa e desenvolvimento no campo da tecnologia hidrelétrica, (ii) tecnologias emergentes e avançadas de instabilidade de fluxo e seus resultados, (iii) tecnologias para conseguir a digitalização de usinas hidrelétrica antigas, (iv) avanços em componentes eletromecânicos e no projeto do gerador, (v) o papel potencial para adaptar a energia hidrelétrica às condições operacionais, (vi) a geração de energia hidrelétrica a velocidade variável, (vii) os novos conceitos de armazenamento de energia hidrelétrica, (viii) o desenvolvimento de tecnologias em hidrelétrica de pequeno porte e (ix) as características ambientais e ecológicas das usinas hidrelétricas. Assim a pesquisa informa, com mais de 250 referências, os desafios, tendências e tecnologias hidrelétricas emergentes.

Sari *et al.* (2018), desenvolvem um artigo de revisão abrangente sobre as inovações tecnológicas e tendências na geração de energia hidrelétrica a partir de condutos forçados, avaliando e comparando os seus benefícios e desafios potenciais.

Paish (2002), direciona sua pesquisa nas hidrelétricas de pequena escala de fio de água, onde não possuem barragens ou armazenamento de água, sendo mais econômica e ambientalmente benigna. No seu estudo é revisando diferentes tecnologias destas usinas de pequeno porte apresentando as inovações em desenvolvimento e as barreiras apresentadas. Conclui o seu trabalho apresentando as principais vantagens e deficiências do setor, como por exemplo, ser uma tecnologia de longa duração e a falta de familiaridade com a tecnologia inibe a exploração dos recursos hídrico, respectivamente.

Por fim, Quaranta *et al.* (2020), desenvolvem uma coleção de estudos relacionados a casos da energia hidrelétrica. São apresentados 17 seção com pouco menos de 80 páginas com os temas: (i) controle e operação de usinas hidrelétricas, (ii) soluções e redução de impactos ambientais, (iii) recuperação de estruturas existentes para geração hidrelétrica e (iv) novos conversores hidrelétricos de baixa queda.

Quadro 9: Combinações dos temas por referência, seção 2.4

Tema principal	Combinação ao tema	Autores
Hidrelétricas	Cenários de crescimento em pequenas geradoras	Mishra <i>et al.</i> (2015)
	Tecnologias Emergentes	Kougias <i>et al.</i> (2019)
	Inovações e Tendências na geração	Sari <i>et al.</i> (2018)
	Pequenas centrais de fio de água	Paish (2002)
	Coleção de estudos	Quaranta <i>et al.</i> (2020)

Fonte: Autoria Própria

Ao finalizar esta seção, no Quadro 9 são apresentados os autores referenciados por tema principal e a sua combinação ao tema, facilitando a visualização dos temas apresentados nesta seção.

Os estudos apresentados demonstram e confirmam que o setor de geração de energia elétrica por meio de seus geradores, estão em constante desenvolvimento, possuindo diversos campos para estudo e inovações de forma atual.

As pesquisas já realizadas, suportam novos e grandes estudos da engenharia de produção, apoiando à oportunidade de pesquisas científicas aplicadas no campo de geração elétrica.

Na eficiência energética, aplica-se às estruturas existentes e em operação e aos novos investimentos, envolvendo os sistemas híbridos de geração de energia elétrica ou os aproveitamentos por outros meios, como o uso de água para irrigação ou consumo. Já na busca de eficiência de produção de energia elétrica através de hidrelétrica, aplicando a estruturas existentes, como a digitalização das usinas, avaliações para *retrofit* ou aproveitamento energético da água e aplicado em novos investimentos com a apropriação adequada dos recursos naturais para a geração mais eficiente.

A sociedade como um todo pode se beneficiar com os estudos e aplicações na área de eficiência energética e de produção pois, melhores aproveitamentos tendem a ser mais sustentável, tanto ao meio ambiente quanto aos empreendimentos técnicos-econômicos, apoiando assim, ao desenvolvimento social, cultural, científico, tecnológico e industrial.

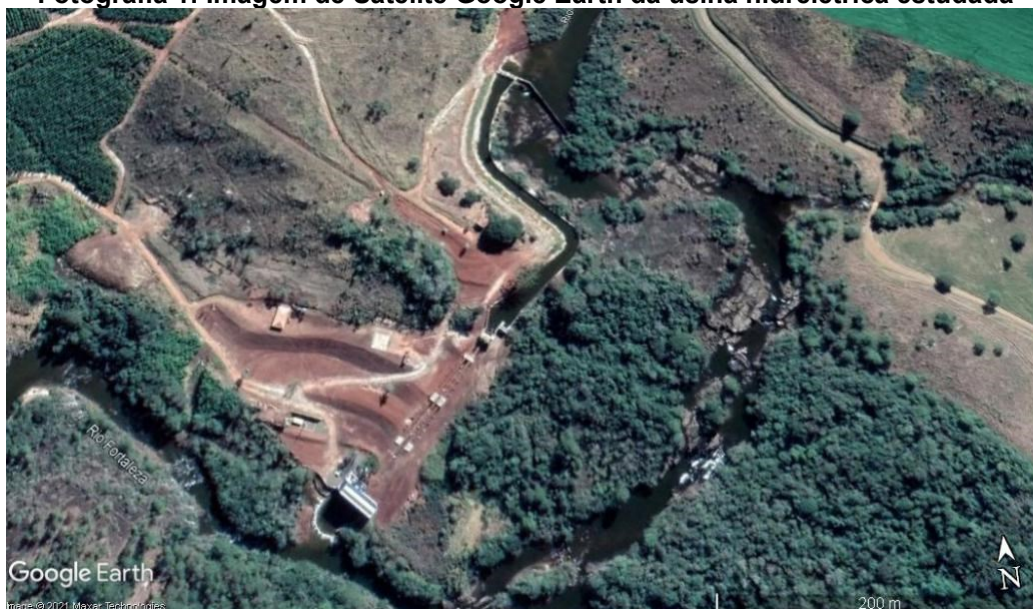
3 METODOLOGIA

Esta seção é dividida em subtópicos, onde no item 3.1 é apresentado o local de estudo e as suas principais características. No item 3.2 é apresentado o fluxograma das etapas de desenvolvimento desta pesquisa, descrevendo as etapas e como será realizado cada uma. E por fim, as ferramentas utilizadas para o desenvolvimento do estudo são apresentadas no item 3.3.

3.1 A Central Geradora Hidrelétrica Estudada

A Usina Hidrelétrica estudada, caracterizada como Central Geradora Hidrelétrica (CGH), é instalada em uma zona rural à 32 quilômetros da cidade de Tibagi, Paraná. A usina possui instalação próxima ao Rio Fortaleza, onde é desviada a água para a geração de energia elétrica. A Fotografia 1 apresenta a imagem via satélite do local da usina instalada.

Fotografia 1: Imagem de Satélite Google Earth da usina hidrelétrica estudada



Fonte: Google Earth Pro (2021)

A usina possui em sua instalação 2 turbinas do tipo Francis com potência nominal de 2,5MW cada, totalizando a uma potência nominal instalada de 5MW, uma das características de uma CGH (potência instalada menor que 5MW). Na Fotografia 2 apresentada, estão as duas turbinas instaladas da usina.

Fotografia 2: Duas turbinas instalada do tipo Francis, totalizando 5MW de potência instalada



Fonte: Aatoria Própria (2021)

A usina também pode ser classificada de acordo com a utilização da água do rio. A CGH estudada é caracterizada como usina hidrelétrica de fio de água ou *run-of-river*, pois é realizado um desvio do rio por canal adutor, possuindo pouco ou quase nenhum reservatório de água antes da barragem. A Fotografia 3 apresenta na região em amarelo o canal que desvia o rio e a linha em azul apresenta o caminho natural do rio Fortaleza.

Ainda na Fotografia 3, é apresentada outras características da usina estuda. Percorrendo o caminho da água, o Rio Fortaleza é desviado para o canal adutor, destacado em amarelo, com extensão de aproximadamente de 290 metros, entrando a água pela tomada d'água e percorrendo até a câmara de carga. Na câmara de carga é direcionado a água para os condutos forçado em vermelho, que direciona a água para cada turbina. Estes condutos forçados são metálicos possuindo um diâmetro interno de 2,4 metros e comprimento de 163 metros cada; um conduto para cada turbina. A água assim entra na casa de força (em lilás), onde possui as turbinas e todos os elementos para a geração de energia, passando pelas turbinas e sendo devolvido ao curso do mesmo rio, indicado na linha em laranja.

Fotografia 3: Características gerais da CGH estudada



Fonte: Adaptado de Google Earth® (2021)

A Fotografia 4 apresenta a região da tomada d'água, onde o rio Fortaleza é direcionado para dentro do canal. Esta região é composta por comportas metálicas para fins de controle de volume do canal ou manutenção, quando necessário. Nesta região possui uma barragem em concreto para elevar o nível do rio para a geração de energia.

Fotografia 4: Região da tomada d'água



Fonte: Autoria Própria

Já na câmara de carga a água do canal é recebida para ser direcionada para os condutos. A Fotografia 5 apresenta a região da câmara de carga. Neste ponto,

possui duas comportas metálicas hidráulicas interligadas com a automação para disponibilizar a água para cada conduto forçado e conseqüentemente para cada turbina. Anterior a entrada de água para os condutos, possui um conjunto de grades metálicas finas para reter materiais de tamanho não permitidos às turbinas. Possui também nesta região, um controlador de nível do canal para a operação.

Fotografia 5: Região da Câmara de Carga



Fonte: Autoria Própria

Já a Fotografia 6 apresenta as duas linhas de condutos forçados, atendendo cada turbina individualmente e ao fundo o local onde está instalado a casa de força, onde contém as turbinas e todos os elementos necessários para a geração de energia elétrica.

Fotografia 6: Local dos Conduitos Forçados e Casa de Força

Fonte: Autorial Própria

A usina possui como fonte de receita a venda de energia pelo sistema de Geração Distribuída (GD), utilizando como meio de distribuição de energia a rede elétrica de concessão da concessionária regional.

Quanto à operação de produção de energia elétrica, é dada por automatização parametrizada e por controle de um supervisor onde são operados por funcionários, em 24 horas do dia, por uma empresa terceirizada, de forma remota. A única variável que a operação remota consegue alterar é a da potência ativa de cada turbina e os demais parâmetros são automatizados de acordo com esta potência ativa estipulada pelo operador remoto. A tomada de decisão para determinar esta potência ativa de cada turbina, já apresentada na seção de justificativa deste estudo, é baseada nas informações instantâneas do nível de água do canal na câmara de carga e através da capacitação dos operadores, experiência da empresa terceira.

Esta potência ativa solicitada pelo operador ajusta as configurações do sistema através da automação e assim a energia potencial da água é convertida das turbinas, pelo seu eixo, para os geradores. A energia elétrica gerada é assim

enviada ao transformador, depois para uma subestação interna e posteriormente é destinado a energia para a rede de distribuição elétrica.

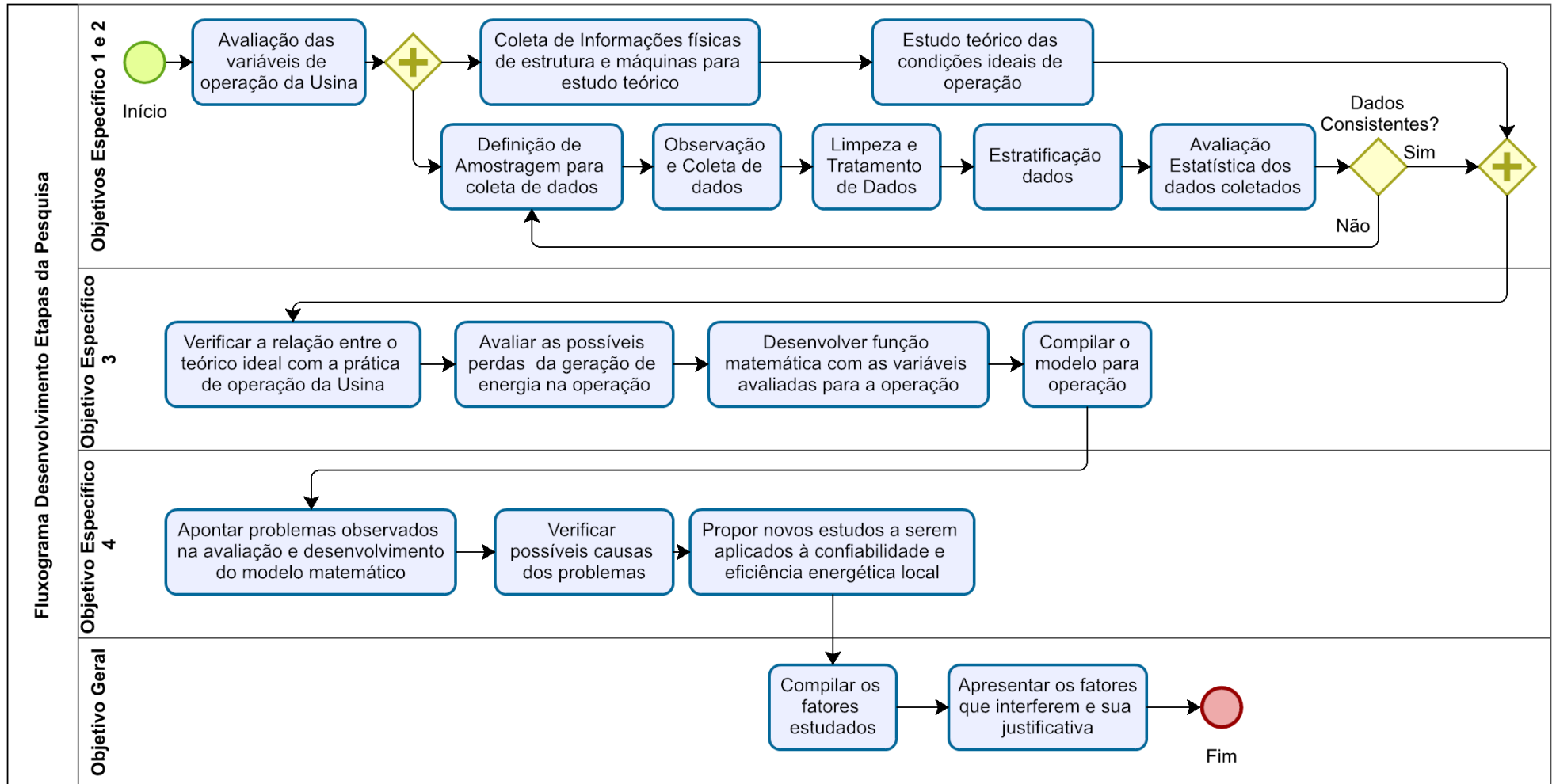
A importância da potência ativa, após determinada para cada turbina, com os elementos disponíveis para a geração de energia elétrica é determinante de forma direta que quanto maior a potência ativa nas turbinas maior será a geração de energia elétrica instantânea em MW/h e conseqüentemente, maior receita para a usina.

3.2 Descrição das etapas da pesquisa

Nesta seção são apresentadas as etapas da pesquisa bem como a explicação de cada etapa a ser desenvolvida. O Fluxograma 1 apresenta um delineamento com as etapas a serem desenvolvidas bem como o enquadramento das atividades aos objetivos geral e específicos, estipulados para esta pesquisa.

As seções 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3 estão relacionados ao objetivo específico 1 e 2, avaliando e identificando os fatores que mais interferem na operação de energia elétrica. Já a seção 3.2.4 está relacionada ao objetivo específico 3, para desenvolver uma função matemática para apoio a tomada de decisão. A seção 3.2.5 está relacionada ao objetivo específico 4 propondo novos estudos para melhorar a confiabilidade de operação e na eficiência energética. Por fim, a seção 3.2.6 está relacionada ao objetivo geral desta pesquisa.

Fluxograma 1: Fluxograma para o desenvolvimento do estudo bem como as relações com os objetivos



Fonte: Autoria Própria

3.2.1 Avaliação geral da estrutura

Ao iniciar a pesquisa, foi necessário compreender as variáveis aplicadas ao processo produtivo na geração de energia, verificando os dados de supervisórios, equipamentos instalados, a forma de operação entre os demais pontos de verificação, avaliando às variáveis de operação e da estrutura instalada. Assim, esta primeira etapa de “Avaliação das variáveis de operação da usina” foi apoiada a compreender a forma de geração de energia atualmente da usina.

3.2.2 Avaliação teórica

A partir da avaliação das variáveis para a geração de energia, foi necessário fazer um levantamento de como a usina foi dimensionada em caso ideal teórico de projeto (ver em seção 3.3.1, avaliação teórica) e assim foram coletadas as informações necessárias para cálculo ideal teórico por meio das variáveis e consideradas para o dimensionamento da geradora de energia. Assim, foi separado em duas etapas estes tópicos, sendo: “Coleta de Informações físicas de estrutura e máquinas para estudo teórico” e posteriormente foi realizado um “Estudo teórico das condições ideais de operação”. Este tópico é realizado em paralelo até o final da etapa de “Avaliação prática” do próximo subtópico 3.2.3.

3.2.3 Avaliação prática

Neste momento da pesquisa foi realizado a coleta de dados na prática e avaliação estatística das condições de operação da usina separados também por etapas.

Na etapa de “Definição de amostragem para coleta de dados”, determinou-se a amostragem e quais variáveis coletadas do supervisório da usina.

Em “Observação e coleta de dados”, foi o momento da coleta de dados a partir das amostras definidas na etapa anterior. Como a empresa não dispõe dos dados históricos armazenado em banco de dados e somente possui os dados instantâneos da usina, disponível na tela do supervisórios, foi desenvolvido um programa em na linguagem de programação Python e bibliotecas disponíveis para

que possa coletar os dados da tela do supervisor e armazenar em arquivos com formato de arquivo *comma-separated-values* (.csv). Com o programa desenvolvido e testado foi determinado o período de coleta de dados e intervalo entre as variáveis coletadas.

Depois dos dados coletados em planilha, foi necessário realizar a “Limpeza e tratamento de dados” de todas as variáveis verificando, por exemplo, dados duplicados, padronização dos dados, correções nas variáveis ou o que for necessário para manter a confiabilidade dos dados. Por seguinte, realizou-se a estratificação dos dados tratados, separando assim as variáveis em coleções e gerenciáveis para a próxima etapa. As duas etapas foram realizadas pela linguagem de programa Python, utilizando bibliotecas disponíveis para este fim.

Posterior a esta fase, realizou a “Avaliação estatística dos dados coletados” onde, com os dados estratificados, utiliza-se ferramentas estatísticas com o software *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS®) Statistics e a linguagem de programação Python através de gráficos, estatística descritiva e regressões, verificando padrões e tendência nos dados dentro das condições práticas de operação da usina.

Assim, verificou-se se os dados analisados eram suficientemente consistentes para as próximas etapas onde, se não fossem, deveriam retornar a etapa anterior de “Definição de amostragem para coleta de dados” e refazer o processo para ter consistências efetivas para as próximas avaliações.

3.2.4 Avaliação entre o teórico ideal e prática

Nesta seção, fez-se a relação entre o teórico ideal de projeto com as condições reais práticas da operação da usina hidrelétrica onde foram subdivididas em quatro partes.

Para o estudo teórico ideal, foi verificado no referencial teórico deste estudo, diversas relações necessárias feitas entre uma teoria ideal e de projeto e a aplicação para a prática. Pesquisas feitas, por exemplo, em busca da capacidade de instalação por Hosseini *et al.* (2005), Santolin *et al.* (2011), Kaldellis *et al.* (2005) e Montanari (2003), onde fizeram avaliações teóricas e técnico-econômica para a definir capacidade ideal em novas instalações ou em pesquisas em busca de

otimização de operação nos estudos de Arce *et al.* (2002) e Chuangang *et al.* (2016), onde buscaram fazer a programação dinâmica das usinas instaladas através da teoria ideal calculada. Esses estudos apresentaram a necessidade de fazer a relação entre a teoria com a prática, assim sendo utilizada também nesta pesquisa.

Por meio das pesquisas indicados no referencial teórico, foi determinado que, através das características iniciais da usina hidrelétrica estudada, a pesquisa de Arce *et al.* (2002) mais se aproxima a esta. Mesmo sendo aplicada a sua pesquisa na Usina Hidrelétrica de Itaipu, pode-se verificar que as turbinas têm o mesmo tipo o que determina nas definições das demais variáveis a serem avaliadas e calculadas. No tópico 3.3.1, avaliação teórica, foi apresentado a formulação utilizada para este cálculo ideal teórico.

Ao continuar no Fluxograma 1 desta pesquisa, o primeiro ponto nesta seção é fazer a relação entre as avaliações dos dados práticos com as condições teóricas ideais de projeto da estrutura instalada e verificado a proximidade ou não dos dados.

Com esta relação, permitiu-se “Avaliar as possíveis perdas da geração de energia na operação”, verificando ao negócio, as possíveis variáveis que possuem pontos de perdas dentro do sistema de produção de energia elétrica.

Avaliado a prática com a teórica e as possíveis perdas, utilizou-se ferramentas estatísticas para “Desenvolver uma função matemática com as variáveis avaliadas para a operação” e por conseguinte “Compilar o modelo para operação”, onde foi apresentado as condições avaliadas, um modelo matemático para que a operação remota tenha uma recomendação de operação através de uma resposta de qual a potência ativa recomendada para a operação da usina naquele instante e por consequência ter uma melhor eficiência na operação de produção.

3.2.5 Orientações para a prática

Após desenvolvido a avaliação entre a prática e a teoria, verificou-se alguns pontos de melhoria onde que nesta seção buscou “Apontar problemas observados na avaliação e desenvolvimento do modelo” e os problemas observados, “Verificar as possíveis causas dos problemas”.

Com os problemas apresentados e suas possíveis causas, foi proposto ações que podem ser aplicadas à estrutura da usina, mas também a novos estudos

aplicados à confiabilidade de operação e temas relacionados a eficiência energética de operação e do local instalado a usina.

3.3 Ferramentas Utilizadas

Esta seção apresenta as ferramentas utilizadas para o desenvolvimento da metodologia proposta dentro das etapas já apresentadas. São separadas em grupos de avaliação teórica, de estatística e dos softwares utilizados.

3.3.1 Avaliação teórica

Para realizar a comparação e verificação entre a teoria e a prática, foi utilizado uma formulação apresentada por Arce *et al.* (2002), para determinação da eficiência da hidrelétrica, através do cálculo da potência em dependência de outras variáveis, apresentado na equação (1):

$$p = g \cdot \rho \cdot n_t \cdot n_g \cdot \Delta h_l \cdot q \cdot 10^6$$

(1) Arce *et al.* (2002)

Onde, que:

- p é a potência calculada a ser determinada, em MW;
- g é a aceleração da gravidade, em m/s²;
- ρ é o peso específico da água, em kg/m³;
- n_t é a eficiência da turbina, em %;
- n_g é a eficiência do gerador, em %;
- Δh_l é a altura de queda de água, em metros; e
- q é a vazão, em m³/s.

Os dados foram coletados a partir dos dados de projeto da usina hidrelétrica, onde que a gravidade e peso específico são constantes, as eficiências da turbina e do gerador são de dados fornecidos pelos fabricantes ou projeto, a queda líquida de

água é dada por meio da diferença topográfica entre o nível de água da câmara de carga e o nível de saída da água da turbina (à jusante) e a vazão é considerado a relação entre o distribuidor da turbina e a queda líquida instantânea.

3.3.2 Estatística

Nesta seção, apresenta-se as ferramentas estatísticas utilizadas para o desenvolvimento do estudo separadas em grupos de avaliação gráfica, estatística descritiva e regressão linear múltipla.

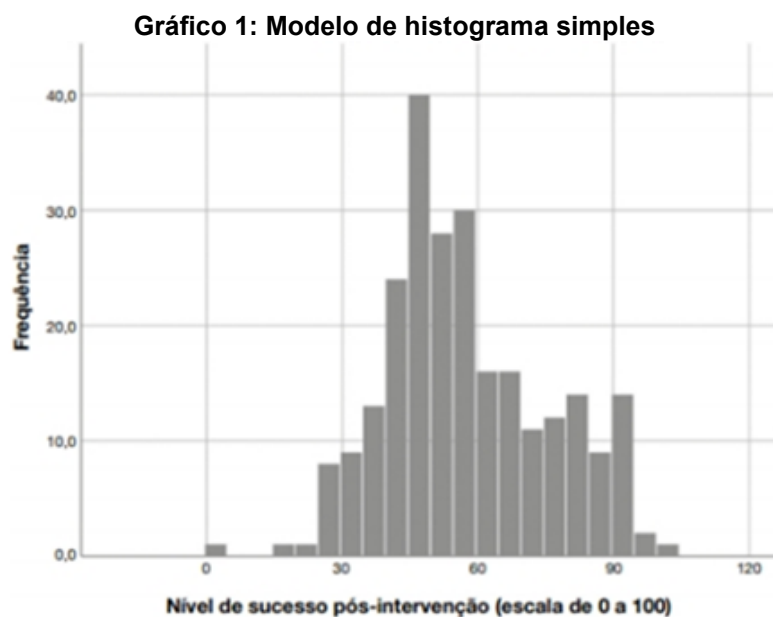
3.3.2.1 Avaliação gráfica

De acordo com Hair (2009, p. 48), ao verificar a necessidade de avaliar os dados de estudo graficamente, apresenta que o:

Objetivo do uso de técnicas gráficas não é a substituição de medidas empíricas, mas complementar com uma representação visual das relações básicas, de modo que os pesquisadores possam se sentir confiantes em seu entendimento dessas relações.

Assim, avaliar os dados de formas visuais e gráficas, auxiliam no entendimento e avaliação dos dados coletados. Nos próximos parágrafos são apresentadas as técnicas gráficas utilizadas para este estudo.

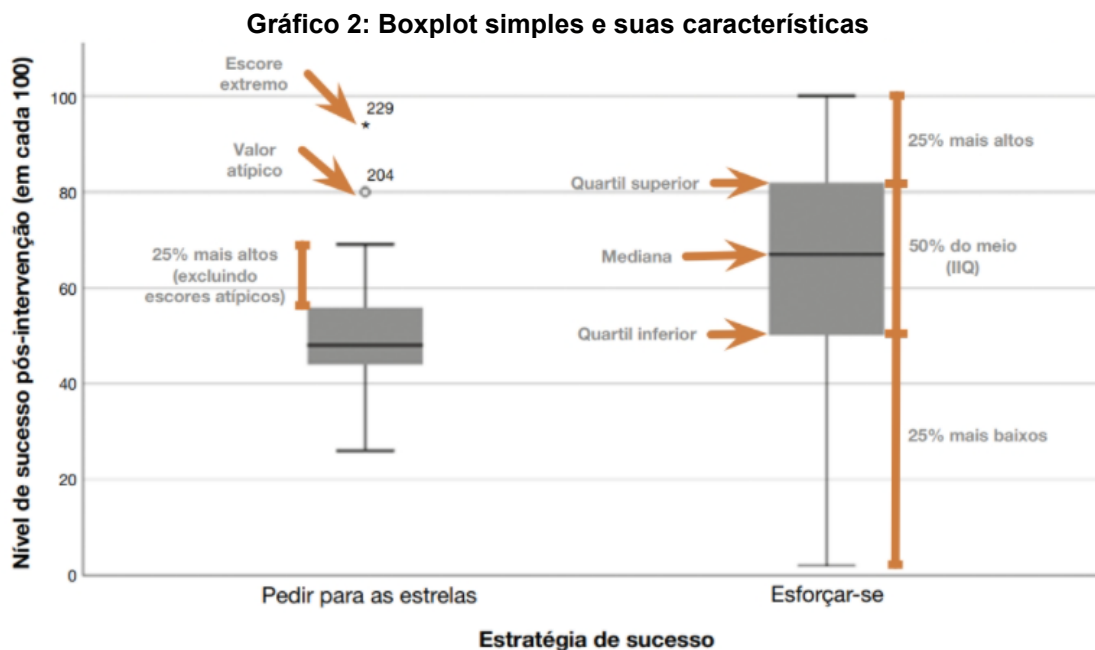
O histograma é um dos gráficos onde é apresentado a variável estudada em distribuição de frequência com escala pré-determinada, podendo ver o formato dos dados e detectar problemas. De acordo com Field (2020, p. 184), apresenta quatro tipos de histograma, possíveis no SPSS®: (i) “histograma simples, para verificar a frequência dos dados de uma única variável”, (ii) “histograma empilhado, que pode ser agrupado os dados apresentados em grupos”, (iii) “polígono de frequências, próximo ao histograma simples, mas apresentado em forma de linha com sombreamento e não de barras com o simples e por fim”, (iv) “pirâmide populacional, onde apresenta as frequências de duas populações sendo importante para comparar distribuição em grupos”. O Gráfico 1 apresenta um exemplo de histograma simples, onde as barras apresentam a frequência no eixo y dos dados escalados de 1 a 100, no eixo x.



Fonte: Field (2020, p. 189)

Outra ferramenta utilizada para avaliar os dados é o *boxplot*, ou diagrama de caixa e bigodes, onde pode-se visualizar os dados coletados avaliando algumas das características dos dados, como variabilidade ou ponto extremo. Field (2020, p. 191), apresenta três tipos de caixas e bigodes, disponíveis no Software SPSS, são eles: (i) “Caixa e bigode 1-D, apresentando somente um diagrama para dos escores da variável de resultado escolhida”, o (ii) “de caixa e bigode simples, onde produz múltiplos diagramas para a variável resultado escolhida” e o (iii) “caixa e bigodes agrupados, sendo igual ao simples exceto pelo fato que dividir os resultados de acordo com uma variável categórica”.

O Gráfico 2 apresenta um *boxplot* simples, apresentando suas características. A caixa é traçada em torno da mediana da variável e o bigode é a parte superior e inferior contém 50% das observações, onde são aproximadamente 25% para cima e 25% para baixo, dependendo dos dados fora da caixa e bigode, que são demonstrados por pontos fora como escore extremo ou valor atípico. Assim, o *boxplot* é separado por quarto quartis (partes de 25%, aproximadamente cada) e apresenta *outliers*, para avaliação dos pontos fora ou atípico.



Fonte: Field (2020, p. 193)

Quando possui diversas variáveis, é necessário verificar os relacionamentos entre essas variáveis. Uma das formas de visualizar é através de gráficos de dispersão onde, verifica-se uma variável em relação à outra. De acordo com Field (2020, p. 208), o gráfico de dispersão auxilia a identificar casos incomuns de uma variável que pode ser influenciada a outra.

Field (2020, p. 208), apresenta oito categorias para este gráfico, são eles: (i) “dispersão simples, relação entre uma variável contínua a outra”, (ii) “dispersão agrupado, próximo ao de dispersão simples, porém pode exibir pontos diferentes a grupos diferentes, por cores ou símbolos”, (iii) “dispersão simples 3-D, representa valores de uma variável contínua às outras duas variáveis”, (iv) “dispersão agrupado 3-D, mesmo caso a anterior, mas separando o pontos diferente em grupos sendo visualizados por cores ou símbolos diferentes”, (v) “resumo de pontos, próximo ao de utilização do gráfico de barras, só que os valores são demonstrados por pontos”, (vi) “dispersão simples de pontos, conhecido como gráfico de densidade, sendo úteis para observar o formato dos dados na distribuição de valores”, (vii) “matriz de dispersão, sendo utilizado para a verificação de múltiplos pares de variáveis em cada célula da grade” e por fim, (viii) “ponto-linha, que produz um gráfico representando uma estatística de resumo e são importantes para comparar estatísticas, como a média, entre grupos ou categorias”.

Através dos dados dispersos entre duas variáveis, Dancey e Reidy (2018) apresenta os coeficientes de correlação entre os dados chamado de *r de Pearson*, onde “mostra a magnitude, o grau de relacionamento e a probabilidade de tal fato acontecer”. Assim, quando mais próximo a 1 mais forte a correlação, podendo ser positivos – quando uma variável é forte a outra tende a ser forte também – e negativo – quando uma variável tende a ser forte a outra tende a ser fraca, de forma associada.

Figura 1: Intensidade das correlações positivas e negativas

Perfeito	+1	-1
Forte	+0,9	-0,9
	+0,8	-0,8
	+0,7	-0,7
Moderado	+0,6	-0,6
	+0,5	-0,5
	+0,4	-0,4
Fraco	+0,3	-0,3
	+0,2	-0,2
	+0,1	-0,1
Zero	0	

Fonte: Dancey e Reidy (2018, p. 177)

A Figura 1 apresenta esta intensidade na correlação entre os dados positivos e negativos.

3.3.2.2 Estatística Descritiva

Antes de iniciar a coleta de dados, determina-se a amostra coletada dentro da população total da usina hidrelétrica. Dancey e Reidy (2018, p. 41) enfatiza que os pesquisadores utilizam amostras, principalmente, porque são mais baratas, mais rápidas e mais convenientes do que avaliar toda a população. Assim, dentro a população avaliada é necessária determinar as amostras corretas para a coleta dos dados, ondem deverão ser avaliados e verificados se são consistentes ou não, calculando-se o erro amostral.

O erro amostral ocorre, de acordo com Dancey e Reidy, (2018, p. 50) pois “simplesmente não estamos utilizando todos os membros da população-alvo”. Por definição em seu livro, o erro amostral é a diferença entre o parâmetro populacional e a estatística amostral, ou seja, é necessário verificar a população total e relacionar ela com a estatística selecionado para a amostra e buscar reduzir o erro verificando a sua diferença entre amostra e população total.

Outras ferramentas utilizadas, que são de tendência central, é a média, calculada pela soma de todos os valores de uma amostra dividido pela quantidade de valores somados desta amostra, o da mediana, que é a ordenação dos valores em forma crescente e verificado o ponto central dos dados organizados e o da moda, para avaliação dos dados que mais aparecem em uma amostra.

Outra verificação utilizada é a da distribuição dos dados, mais diretamente a da distribuição normal, onde que se os dados sendo normais em sua aleatoriedade, poderão se tornar previsíveis. Assim, a distribuição normal, por definição de Dancey e Reidy (2018, p. 74), é a “distribuição de valores onde apresenta um pico na região central que decai simetricamente de ambos os lados da curva criando uma forma de sino onde que, no caso ideal, sua mediana, média e moda estão localizados no pico da curva”.

Aos considerar que os dados amostrais estão dentro de uma distribuição normal, pode-se avaliar as correlações bilaterais previstas entre as variáveis onde busca avaliar as relações entre as variáveis estudadas. Dancey e Reidy (2018, p. 170) aponta que a exploração dos relacionamentos entre as variáveis pode incluir quatro passos: (i), “inspeção de diagramas de dispersão”, (ii) “teste estatístico de *r de Pearson*, que nos mostra a magnitude e o grau de relacionamento entre as variáveis e a probabilidade de tal relacionamento acontecer”, (iii) “limites de confiança em torno da estatística *r de Pearson*” e (iv) “interpretação dos resultados”.

3.3.2.3 Regressão Linear Múltipla

Após tratar e avaliar os dados coletados e posterior comparados com a teoria calculada, busca-se apresentar um modelo de regressão linear para a sugestão de operação remota da usina.

A análise de uma regressão linear, de acordo com Dancey e Reidy (2018, p. 367), resulta em uma fórmula que pode prever uma resposta y em uma relação direta às variáveis predictoras x 's, ponderada pelo melhor modelo de ajuste à linha determinada.

Em regressão múltipla, de acordo com Hair *et al.* (2009), esta pode ser usada para analisar a relação de uma única variável (critério) com várias variáveis independentes (preditoras), buscando prever o critério através das preditoras, sendo que cada preditora é ponderada pelo procedimento de análise de regressão, garantindo a melhor previsão das variáveis independentes. Assim sendo, a análise de regressão múltipla é uma técnica de dependência onde deve possuir uma correlação significativa para que ao prever um valor resposta.

Determinando o melhor modelo com a linha de resposta da previsão da regressão linear múltipla, ainda assim teremos alguns erros, confirmados por resíduos da análise de regressão. Hair *et al.* (2009), define resíduos como uma parte de uma variável dependente, porém não explicada pelo modelo linear e sim a qualquer parte não linear da relação aparecerá nos resíduos.

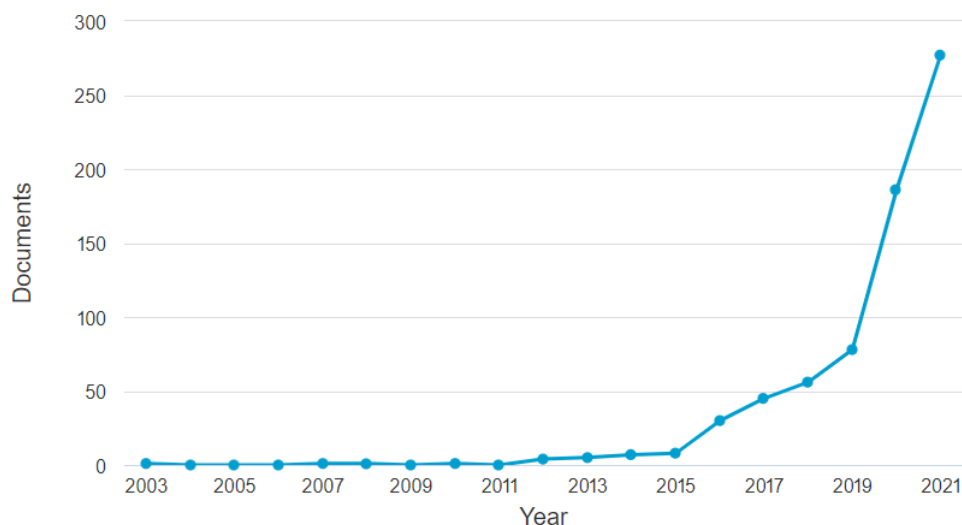
3.3.3 Softwares Utilizados

Esta seção foi separada de acordo com os softwares que foram utilizados para o desenvolvimento deste estudo.

3.3.3.1 IBM® SPSS® Statistics

Ao fazer uma pesquisa breve na base de dados Scopus®, buscando o termo ['SPSS *Statistics*' AND '*data analysis*'] para *TITLE-ABS-KEY*, verifica-se no Gráfico 3 o crescimento significativo relacionado ao uso do SPSS® *Statistics* com análise de dados, com 277 documentos só no ano de 2021.

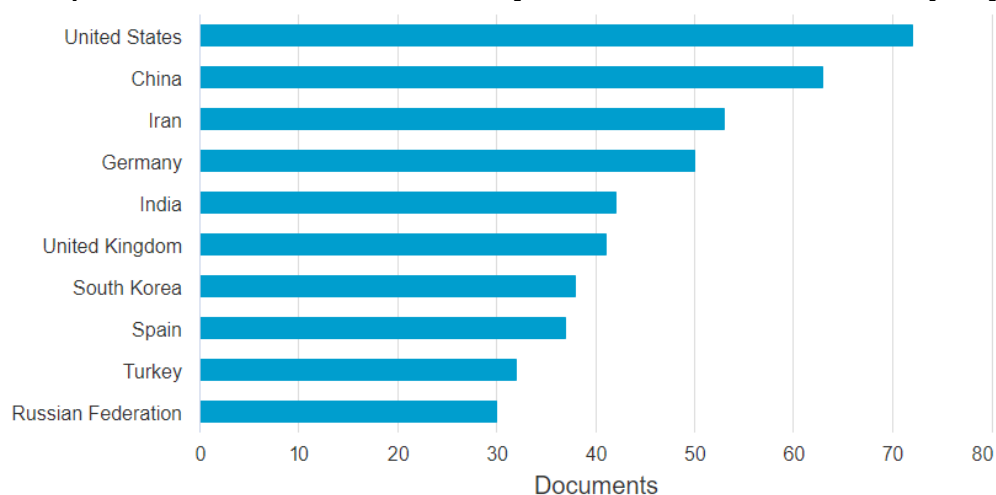
Gráfico 3: Resultados de documentos na base de dados Scopus® por ano para TITLE-ABS-KEY com o termo ['SPSS Statistics' AND 'data analysis']



Fonte: Scopus (2021)

Ainda avaliando os dados do Scopus (2021) nas mesmas condições de pesquisa, verifica-se no Gráfico 4 que os Estados Unidos e China estão no topo de documentos publicados com 72 e 63, respectivamente. Verifica-se que existe uma grande oportunidade de ascensão do uso do software para análise de dados no Brasil, que possui somente 13 documentos ou pouco mais de 18% em relação aos Estados Unidos, de documentos publicados no Scopus.

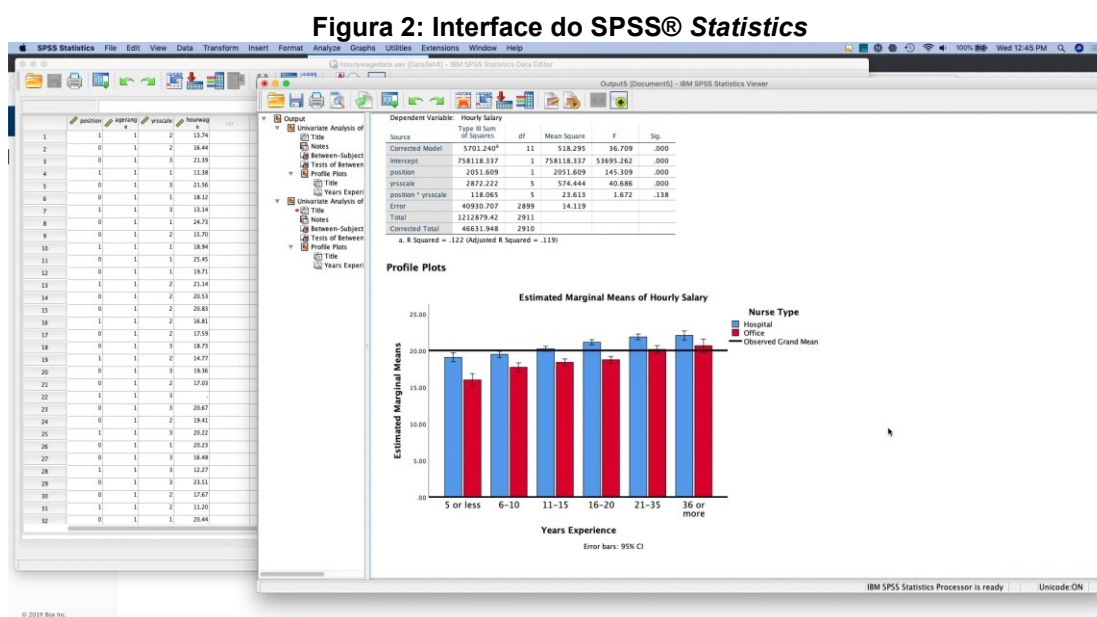
Gráfico 4: Resultados de documentos por país ou território na base de dados Scopus® por ano para TITLE-ABS-KEY com o termo ['SPSS Statistics' AND 'data analysis']



Fonte: Scopus (2021)

Para avaliação estatística e desenvolvimento de regressão, foi utilizado o software IBM® SPSS Statistics, na versão 23, disponibilizado pelo Laboratório de

Pesquisa Organizações e Sociedade da UTFPR. De acordo com o desenvolvedor IBM® (2021), o software é uma potente plataforma de software estatístico onde pode analisar e entender melhor os dados para resolver problemas complexos sendo fácil de usar, confiável e abrangente. A Figura 2 apresenta a interface de dados e de resultados do software utilizado. Pode-se utilizar dos módulos disponíveis pelo software em estatística avançada, regressão, previsão, árvore de decisão, amostrar complexas, entre diversos outros.

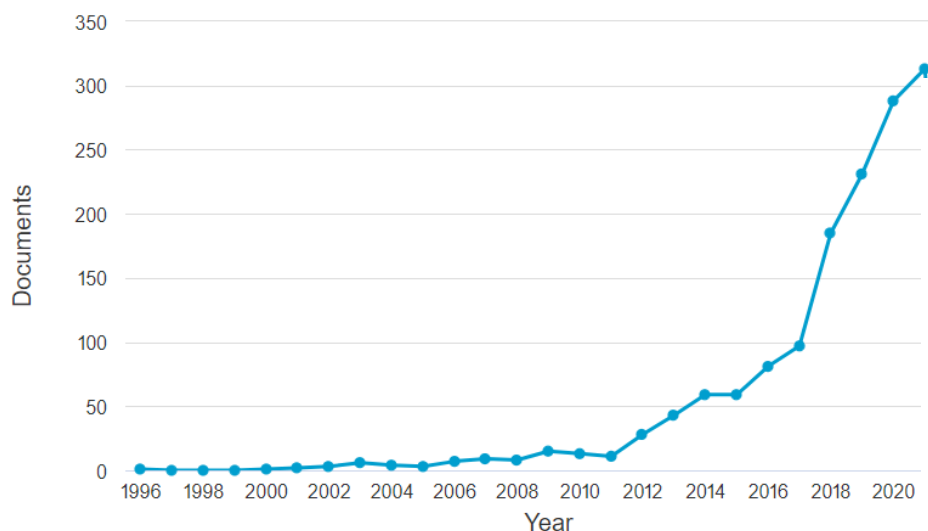


Fonte: IBM® (2021)

3.3.3.2 Python Spyder IDE

Ao fazer outra pesquisa breve na base de dados Scopus®, buscando o termo ['python' AND 'data analysis'] para TITLE-ABS-KEY, verificamos no Gráfico 5 também o crescimento significativo relacionado a linguagem de programação Python com análise de dados, com 313 documentos só no ano de 2021.

Gráfico 5: Resultados de documentos na base de dados Scopus® por ano para TITLE-ABS-KEY com o termo ['python' AND 'data analysis']

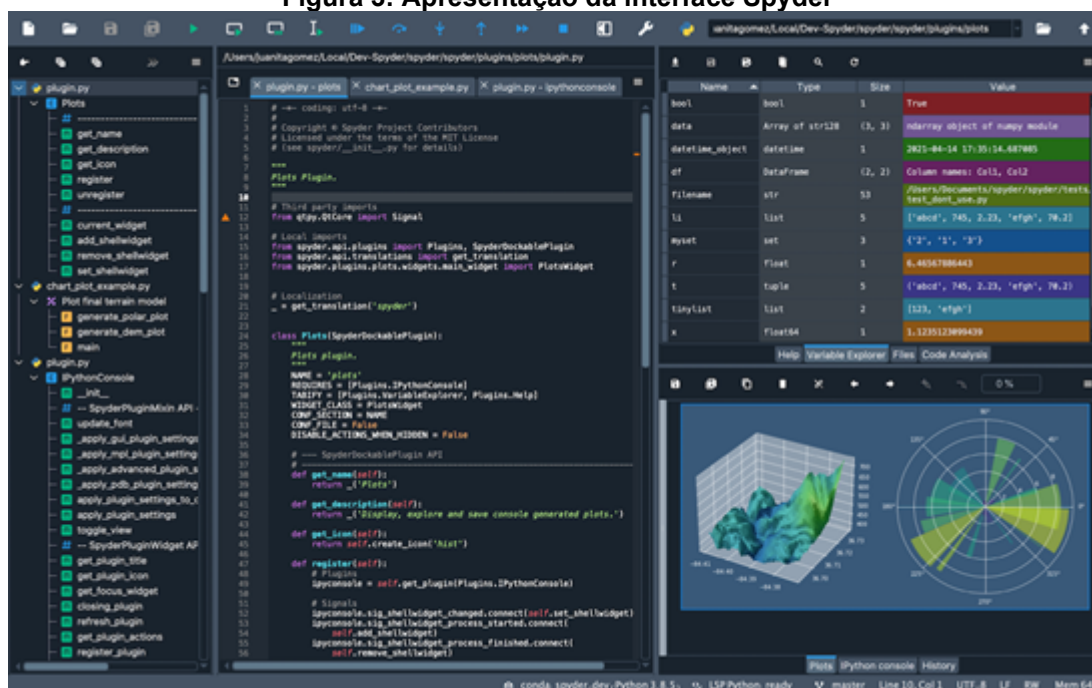


Fonte: Scopus® (2021)

Para coleta, tratamento de dados e a estratificação foi utilizado a linguagem de programação Python. Para isto, é utilizado uma *Integrated Development Environment* (IDE) através do software Spyder. De acordo com o seu site oficial Spyder (2021) é um ambiente científico, gratuito e de código aberto escrito em Python e para uso com Python, projetado para analistas de dados, engenheiros e cientistas contando com ferramentas de desenvolvimento abrangente para também a exploração de dados.

O software possui componentes para edição de código, execução linhas de códigos, explorador de variáveis, uso de imagens e gráficos, entre diversos outros. A Figura 3, apresenta a interface principal do Spyder e algumas de suas visualizações possíveis.

Figura 3: Apresentação da interface Spyder



Fonte: GitHub (2021)

Para facilitar o desenvolvimento da avaliação e estratificação dos dados, foram utilizadas bibliotecas livres em Python, prontas para o uso. As principais utilizadas foram: (i) Pandas, é uma ferramenta para análise e manipulação de dados, (ii) Numpy é o pacote para computação científica, (iii) Matplotlib, é uma biblioteca para criação de visualizações estáticas e interativas através de gráficos, figuras, entre outros e (iv) o Seaborn e o (v) Plotly para visualização de dados, desenhar gráficos estatísticos e informativos.

Quadro 10: Site de documentação bibliotecas utilizadas

Biblioteca	Site da Biblioteca
Pandas	https://pandas.pydata.org/docs/
Numpy	https://numpy.org/doc/stable/
Matplotlib	https://matplotlib.org/stable/
Seaborn	https://seaborn.pydata.org/
Plotly	https://plotly.com/python/

Fonte: Autoria Própria

Para ver a documentação das bibliotecas, é apresentado a Quadro 10, com os sites relacionados de suas documentações para uso no software.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados os resultados e as discussões realizadas nesta pesquisa. Esta seção está organizada de acordo com o Fluxograma 1, apresentado na metodologia.

4.1 Avaliação das Variáveis de Operação da Usina

Inicialmente, foi realizado uma verificação geral das variáveis disponíveis para estudo junto a Usina Hidrelétrica e a definição das variáveis a serem coletadas para o estudo.

Para auxiliar, a empresa disponibilizou acesso as informações do manual técnico da turbina e o manual técnico do gerador, sendo dois conjuntos geradores iguais. Também apresentou as informações do projeto de implantação, dando acesso a queda líquida e vazão determinada em projeto e acesso as ordens de serviço de paradas e de anomalias no sistema gerador e o tipo de ação tomada pela empresa.

Para a coleta de dados de operação, a empresa apresentou os dados disponíveis no sistema de automação, onde as informações estão disponíveis somente em seu supervisor, utilizado para a operação da usina.

Com base na verificação local da usina e as referências utilizadas, reforçando o estudo de referência de Arce *et al.* (2002), são apresentadas no Quadro 11 as variáveis utilizadas para a coleta, advindas do supervisor de operação da usina para utilização na avaliação deste estudo.

Empiricamente, foram determinadas as importâncias das variáveis (alto, médio ou baixo) de possível impacto para estudo, que poderão ser verificadas positivamente ou negativa ao final deste estudo.

Quadro 11: Variáveis coletadas para a avaliação de operação

Grupo	Nome Variável	Unidade	Importância
Geral	Data	dia	alta
Geral	Horário	hora (h)	alta
Geral	Nível do Canal	metro (m)	alta
Geral	Temperatura	graus Celsius (°C)	baixa
Unidade Gerador 1 (UG1)	Tensão	Volts (V)	média
Unidade Gerador 1 (UG1)	Corrente	Ampere (A)	média
Unidade Gerador 1 (UG1)	Potência Ativa	quilowatt (kW)	alta
Unidade Gerador 1 (UG1)	Potência Reativa	quilo Volt-Ampere Reativo (kVAr)	baixa
Unidade Gerador 1 (UG1)	Fator Potência	sem unidade (s.u.)	baixa
Unidade Gerador 1 (UG1)	Distribuidor Vazão	porcentagem (%)	alta
Unidade Gerador 1 (UG1)	Tensão Excitação	Volts (V)	média
Unidade Gerador 1 (UG1)	Corrente Excitação	Ampere (A)	média
Unidade Gerador 1 (UG1)	Acumulado Geração Energia	megawatt hora (MWh)	alta
Unidade Gerador 1 (UG1)	Velocidade Turbina	rotações por minuto (RPM)	média
Unidade Gerador 1 (UG1)	Potência Set Operador	quilowatt (kW)	alta
Unidade Gerador 1 (UG1)	Potência Aparente	quilo Volt-Ampere (kVA)	média
Unidade Gerador 2 (UG2)	Tensão Fase R	Volts (V)	média
Unidade Gerador 2 (UG2)	Corrente Fase R	Ampere (A)	média
Unidade Gerador 2 (UG2)	Potência Ativa	quilowatt (kW)	alta
Unidade Gerador 2 (UG2)	Potência Reativa	quilo Volt-Ampere Reativo (kVAr)	baixa
Unidade Gerador 2 (UG2)	Fator Potência	sem unidade (s.u.)	baixa
Unidade Gerador 2 (UG2)	Distribuidor Vazão	porcentagem (%)	alta
Unidade Gerador 2 (UG2)	Tensão Excitação	Volts (V)	média
Unidade Gerador 2 (UG2)	Corrente Excitação	Ampere (A)	média
Unidade Gerador 2 (UG2)	Acumulado Geração Energia	megawatt hora (MWh)	alta
Unidade Gerador 2 (UG2)	Velocidade Turbina	rotações por minuto (RPM)	média
Unidade Gerador 2 (UG2)	Potência Set Operador	quilowatt (kW)	alta
Unidade Gerador 2 (UG2)	Potência Aparente	quilo Volt-Ampere (kVA)	média

Fonte: Autoria Própria

O Quadro 11 foi dividida em grupos, por nome da variável, sua respectiva unidade disponível para coleta e o seu grau de importância. O grupo chamado de geral é de uso comum a qualquer unidade geradora e os dados por unidade geradora (chamada de UG1 e UG2), são informações individualizadas a cada conjunto gerador. A soma de algumas das variáveis foi realizada durante a avaliação para verificar o sistema como um todo. Abaixo são descritas cada variável apresentada pela empresa.

A “Data” e “Horário”, são informações de referência para a coleta e temporal para a avaliação dos dados, sendo suas unidades em dia e horário, respectivamente. Este último está no formato de horas, minutos e segundos (hh:mm:ss) no instante da coleta. Sua prioridade é considerada alta devido a necessidade de referência de todos os dados coletados.

Quanto ao “Nível do Canal”, esta é a informação com a unidade dada em metros, que são recebidos através de um sensor ultrassônico fixo localizado na

câmara de carga, a qual apresenta uma referência para a operação proporcional a queda líquida da usina. Estes dados possuem uma alta importância pois, como está relacionado à queda de água da usina, quanto mais alta estiver, mais próximo está do dimensionamento de queda líquida determinada em projeto para geração para cada turbina. A amplitude disponível para este sensor está entre 3,80 e 9,10 metros.

A “Temperatura”, medida em graus Celsius, é um dado de baixa importância, mas é considerado pois seu sensor está vinculado a temperatura dentro da casa de força, junto ao conjunto gerador.

Para as demais variáveis, a mesma aplicação é dada tanto para a UG1 quanto para UG2, por tratar-se das mesmas informações, mas para cada unidade geradora.

A “Tensão” (em Volts) e a “Corrente” (em Ampère) é a informação que está relacionada a geração de energia. É uma consequência da energia mecânica das turbinas transferidas ao gerador, transformado em energia elétrica (média importância). Esta informação está sendo coletada pela automação na saída da rede elétrica de cada gerador. De acordo com o manual técnico do gerador, a “Tensão” de projeto que sai de cada gerador é de 2.300 Volts, podendo oscilar dentro deste valor de projeto. Já a “Corrente” é alterada de acordo com a geração podendo variar entre 0 e 650 Ampère.

A “Potência Ativa” é dada em quilowatts (kW). Considerada de alta importância pois é a potência instantânea real ativa em cada unidade geradora, durante a geração. Esta potência é de acordo com as configurações aplicadas pelo operador e condições físicas do momento. Cada gerador possui o valor de projeto de até 2610 kW.

A “Potência Reativa” é dada em quilo Volts Ampère reativo (kVAr), a qual não produz energia útil para a geração, mas necessário para produzir o fluxo magnético necessário para a geração. Considerado de baixa importância por não estar relacionado diretamente a geração de energia injetada na rede elétrica, mas parte do acontecimento para a geração.

O “Fator de Potência” não possui unidade pois é a razão entre a “Potência Ativa” e a “Potência Aparente”, no estado atual do sistema. O sistema de automação também ajusta as configurações para que valor fique ao redor do fator 1. Possui grau de importância baixa, pois o sistema se autoajusta nas potências.

O “Distribuidor de Vazão” é a regulagem de vazão da turbina, de acordo com cada potência durante a geração assim, quanto mais aberto o distribuidor, maior a vazão disponível para a geração. É dada em porcentagem de abertura dos distribuidores da turbina, disponibilizando a vazão de água para a geração. O seu valor varia de 0% (fechado) até 100% (totalmente aberto) e depende das condições físicas disponíveis e da potência solicitada sendo que, são ajustados pela automação buscando atender o valor da potência solicitada pela operação. O grau de importância é alto, pois é a forma de avaliar a vazão do sistema de acordo com o projeto da turbina e a disponibilidade da água do rio para a geração bem como para cálculos de potência.

A “Tensão Excitação” (em Volts) e a “Corrente Excitação” (em Ampère), é definido pela automação para criar campo elétrico magnético no gerador suficiente para gerar a energia elétrica. Possui um grau de importância média pois é uma necessidade para o gerador para a geração de energia, de acordo com a potência ativa.

O “Acumulado Geração Energia” é dado em megawatt hora (MWh), que é o acumulado de “Potência Ativa” instantâneas ao longo do tempo da geração. Aqui a importância é alta devido a ser unidade de energia que é entregue a rede elétrica, gerando a receita da usina.

A “Velocidade Turbina” é a rotação em unidade de rotações por minuto (rpm) onde, pelo manual técnico da turbina, o valor de projeto é de 360 rpm, assim mantendo os valores na geração ao redor deste. É considerado de grau médio pois a rotação deve estar estabilizada para a geração de energia elétrica.

A “Potência Set Operador”, dada em quilowatt (kW), é a potência de referência que o operador determina para a geração de energia. Com este valor o sistema de automação busca aproximar o valor da “Potência Ativa” em relação ao dado pelo operador, desde que as condições permitam. Considera-se de alta importância para que possa ser avaliada a operação dada na usina.

A “Potência Aparente”, dada em quilovolts Ampère e é a relação entre a “Potência Ativa” e a “Potência Reativa” do sistema. É dada com baixa importância para efeito de verificação de geração buscando o valor ser mais próximo da Potência Ativa.

4.2 Dados Coletados e Avaliação

Conhecendo as variáveis as coletadas, esta seção apresenta como foi coletado os dados, tratado, estratificado e avaliado. É dividida em subseções para facilitar a compreensão dentro do fluxograma estabelecido bem como ao atendimento aos objetivos específicos relacionados.

4.2.1 Observação e Coleta de Dados

Esta seção é dividida em duas seções com: (i) a coleta de dados gerais para os cálculos e os dados técnicos dos equipamentos utilizados na usina, (ii) a coleta de dados periódicos do supervisor da usina hidrelétrica em questão.

4.2.1.1 Dados Gerais e Equipamentos

Na definição da usina, são considerados que os equipamentos que fazem parte da geração possuam rendimento de acordo com algumas situações. Além de algumas das perdas físicas, mecânicas e elétricas, geralmente são considerados com grande importância os rendimentos da turbina e do gerador.

Para cada turbina instalada, tipo Francis de capacidade de 2,5 MW de potência instalada, os dados de rendimento pela vazão são apresentados na Tabela 1. Para a vazão nominal da turbina de 11,60 m³/s, o rendimento é de 92,80% em relação a potência ideal disponível. Os pontos importantes determinados pelo fabricante é que os dados de rendimento apresentados são em condições em que a queda líquida seja de 25,00 metros e que a operação para cada turbina não pode ser inferior a 40% da vazão nominal da turbina.

Tabela 1: Dados rendimento Turbina Instalada

Vazão (%)	Vazão (m ³ /s)	Rendimento (%)
100%	11,60	92,80
90%	10,44	92,00
80%	9,28	90,20
70%	8,12	87,00
60%	6,96	82,00
50%	5,80	75,00

Fonte: Autoria Própria

Já para o Gerador, o fabricante apresentou os dados de rendimento de acordo com a Tabela 2 onde que para a carga em cada gerador (transferida da turbina para o gerador), têm-se o rendimento do gerador. A capacidade nominal do gerador de carga é de até 2.610 kW.

Tabela 2: Dados rendimento Gerador Instalado

Carga Gerador (%)	Carga Gerador (kW)	Rendimento (%)
100	2.610,00	96,08
75	1.957,20	96,28
50	1.305,00	96,17
25	652,50	94,86

Fonte: Autoria Própria

Devido a formulação teórica possuir a necessidade das informações de vazão, observou-se que para a coleta de dados, não possuiu esta informação diretamente, porém, obteve-se a informação dos distribuidores da turbina que está amplamente relacionado entre a vazão e queda efetiva. Assim, verificando os documentos técnicos dos testes de desempenho da turbina na usina, observou-se os dados apresentados na Tabela 3. Estes dados apresentam a vazão medida na turbina, dada em metros cúbicos por segundo, de acordo com a razão entre o distribuidor e a queda efetiva, dada em porcentagem do distribuidor multiplicado por 100 para cada metro. Assim, pode-se realizar a conversão de porcentagem do distribuidor de cada turbina em vazão.

Tabela 3: Dados de teste de vazão da turbina em relação a razão do distribuidor e queda efetiva

Vazão (m ³ /s)	Razão Distribuidor e Queda Efetiva ((%*100)/m)
4,49	0,95008
4,65	0,93251
4,73	1,07407
4,90	1,13405
5,06	1,17073
5,63	1,28541
5,72	1,32347
5,91	1,38742
6,23	1,42375
6,38	1,43890
6,59	1,51495
6,95	1,59206
7,37	1,68802
7,81	1,80128
8,21	1,90704
8,68	2,02977
9,36	2,15456
10,35	2,60227
11,07	2,42911
11,70	3,15915

Fonte: Autoria Própria

Na necessidade de cálculos para definição da potência, são consideradas para as constantes da equação (1) a aceleração da gravidade com o valor de 9,807 m/s² e a densidade da água de 999 kg/m³.

Por fim, verificou-se também para formulação teórica que houve a necessidade de determinar a queda líquida de água do sistema, onde que no supervisório há uma referência de nível de canal para a operação. Assim, foi realizado a topográfica local, disponibilizado pela empresa, para realizar a verificação. A Fotografia 7 apresenta a topografia realizada na Câmara de Carga, obtendo a referência entre o que está no supervisório e o prático. A relação foi determinada que em 8,75 metros no nível do canal dada no supervisório, a altura de queda de água está para 25,14 metros.

Fotografia 7: Realização de topografia queda efetiva na Câmara de Carga



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 4 apresenta um resumo dos dados observados sobre a usina para a avaliação.

Tabela 4: Dados observados para formulação teórica/prática

Descrição	Valor Referência	Valor Prático
Densidade da Água	999 kg/m ³	
Aceleração da Gravidade	9,807 m/s ²	
Vazão	11,6 m ³ /s	A calcular
Altura Queda de Água	8,75 m	25,14 m

Fonte: Autoria Própria

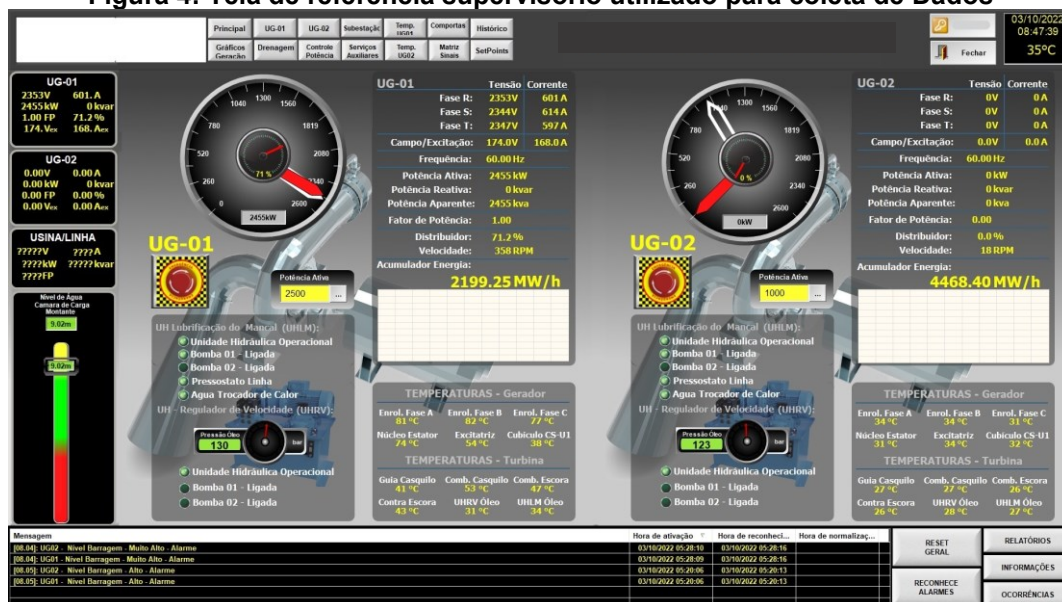
Assim com os dados para atender as equações e as tabelas de rendimentos, pode-se avaliar os dados coletados do supervisor e comparar a teoria de projeto com a prática.

4.2.1.2 Coleta de Dados Supervisorio

Para os dados coletados, a seção foi dividida em três etapas. A primeira etapa, foi a observação dos dados de operação utilizados, a segunda etapa foi a realização da programação em Python para a coleta de dados e a terceira etapa foi o acompanhamento da coleta de dados local.

Foi verificado que a empresa não possui banco de dados históricos da operação, porém, para que a sua operação seja de forma controlável e remota, a empresa possui os dados instantâneos da automação usina através do seu supervisor.

Figura 4: Tela de referência supervisorio utilizado para coleta de Dados



Fonte: Autoria Própria

A Figura 4 apresenta uma imagem da tela de referência do supervisorio, utilizado para operação remota. Nela, são apresentadas as informações disponíveis de cada unidade geradora (UG-01 e UG-02), as informações comuns, como o nível do canal da câmara de carga, temperatura, data e horário e as informações da rede elétrica, conforme apresentado na Seção 4.1.

Para a segunda etapa, como as informações estão disponíveis somente instantaneamente no supervisorio, a coleta de dados foi realizada por meio da captura de imagem periodicamente e assim, coletados os dados através das imagens.

Foi utilizado um programa gratuito no computador da usina, que possui o supervisorio, para realizar a captura de imagem automática onde foi programado para capturar a tela do supervisorio a cada três minutos na resolução da imagem em 1920x1080 pixels. Cada captura realizada é salva em uma pasta pré-determinada no próprio computador da usina para posterior coleta de dados através das imagens.

A coleta de imagens iniciou-se no dia 12 de novembro de 2021 e finalizou em 10 de março de 2022, registrando um total de 41.898 capturas realizadas em 96 dias.

Tabela 5: Total de Capturas de imagens realizadas por dia

Ano	Mês	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2021	Novembro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	163	480	480	480
2021	Dezembro	0	0	0	0	0	274	476	470	478	469	226	0	0	0	0
2022	Janeiro	0	0	315	478	475	476	475	478	477	476	476	477	478	477	320
2022	Fevereiro	475	474	478	439	478	477	478	477	477	476	476	478	478	479	479
2022	Março	476	477	469	470	477	478	477	476	473	364	-	-	-	-	-

Fonte: Autoria Própria**Tabela 6: Continuação**

Tabela 5

16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Total Mensal
480	421	114	478	422	254	480	270	0	0	294	103	0	0	0	-	4919
0	0	150	479	479	477	475	478	479	480	477	478	477	478	186	0	7986
0	0	0	0	312	475	404	254	477	474	479	410	474	476	476	478	11067
475	452	476	479	476	478	476	476	477	476	475	477	477	-	-	-	13289
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4637

Fonte: Autoria Própria

Como

demonstrado

na

Tabela 5 e Tabela 6, são mostradas as quantidades de capturas realizadas do supervisor, por dia relacionado a cada ano e mês. Os dias que estão com zero, não houveram capturas, pois, tiveram problemas na captura, como por exemplo, reinicialização do computador e não iniciado o programa, manutenção ou queda de energia.

Durante o período de captura das imagens do supervisor foi realizado o desenvolvimento do programa em Python para ler as imagens e transformar os dados em tabela. Abaixo é descrito a lógica da programação, apresentado na íntegra através do Apêndice A.

A programação desenvolvida, chamada a partir daqui de *script*, utiliza uma biblioteca chamada *Pytesseract* e o *software Tesseract OCR*, que realiza a identificação de caracteres de vários formatos através de reconhecimento óptico. No caso, foi coletado informações da imagem e transformados em caractere e assim armazenados em uma tabela.

O *script* é iniciado com a importação das bibliotecas necessárias para a sua aplicação. Neste início é inicializado um cronômetro para acompanhamento o tempo de processamento de cada imagem e acessar o caminho (*PATH*) do *software Tesseract OCR*, na leitura das imagens.

Assim, são definidas as funções “coleta_area” e “tratamento_imagem”, que são apresentados na sequência.

O *script*, em sua execução, realiza o seguinte procedimento: acessa uma pasta com todas as imagens capturadas e abre a imagem individualmente. Com a imagem acessada, foi definido em tuplas a área na imagem, em pixels, onde está cada informação a ser coletada. Por exemplo, a informação da data na imagem é definida pela tupla (1798, 8, 1914, 28) e significa que, na imagem a informação data está no pixel no eixo x de 1798 a 1914 pixels e no eixo y de 8 a 28 pixels, formando assim uma área da data. Com essas tuplas definidas para cada variável a coletar, a imagem acessa a função “coleta_area” e realiza o corte da imagem para dada informação a ser coletada.

Esta imagem recortada na sua área da imagem, acessa a função “tratamento_imagem” para que seja realizado o tratamento da imagem e facilitar a interpretação do *Tesseract OCR* para o caractere desejado.

Esses tratamentos de imagens são na ordem: (i) o redimensionamento da imagem (zoom), (ii) o desfoque gaussiano para focar no texto, (iii) a redução de ruídos na imagem, zerado os canais de *RED* e *BLUE* da imagem, (iv) conversão da imagem para escala de cinza e a (v) binarização da imagem, onde as intensidades de cor de 0 a 127 são convertidos em 0 (cor preta) e as intensidade de cor de 128 a 255 são convertidos em 1 (cor branca).

Com este tratamento, a imagem tratada é enviada ao *software Tesseract OCR* para a realizar a melhor conversão em caractere da área definida. Este ciclo é realizado para cada área de cada imagem que possui a informação necessária para a coleta.

Após a descoberta da área da imagem em texto, cada texto é salvo em uma planilha, como apresentado na amostra dos dados brutas na Figura 5. Cada linha apresenta uma imagem e cada coluna apresenta a informação coletada de cada imagem, que no total foram de 28 para este estudo.

Figura 5: Apresentação de amostra dos dados brutos coletadas em planilha

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	data	hora	nivel_ca nal	tempera tura	UG1_Fase R_tensao	UG1_Fas eR_corre nte	UG1_pote ncia_ativa	UG1_pot encia_re ativa	UG1_fato r_potenci a	UG1_distr ibuidor	UG1_cam po_excita cao_tensa o	UG1_cam po_excita cao_corre nte	UG1_acumulad o_energia
2	11/12/2021	15:55:24	6.69m	31°C	2394V	428. A	1745 kW	0 kvar	1.00 FP	90.6 %	144. Vex	139. Aex	1392.31 MW/h
3	11/12/2021	15:58:24	6.69m	31°C	2399V	435.A	1794kW	0 kvar	1.00 FP	90.4 %	145. Vex	140. Aex	1392.42MW/h
4	11/12/2021	16:01:24	6.69m	31°C	2391NV	429.A	1739 kW	29 kvar	1.00 FP	90.0 %	145. Vex	140. Aex	1392.51 MW/h
5	11/12/2021	16:04:24	6.69m	31°C	2394V	43/7.A	1795 kW	23 kvar	1.00 FP	90.1 Yo	146. Vex	141. Aex	1392.59 MW/h
6	11/12/2021	16:07:24	6.69m	31°C	2399V	444.A	1813 kW	0 kvar	1.00 FP	90.2 Yo	145. Vex	140. Aex	1392.68 MW /h
7	11/12/2021	16:10:24	6.71m	31°C	2394V	432.A	1751 kW	18 kvar	1.00 FP	90.1 Yo	144. Vex	139. Aex	1392.77 MW/h
8	11/12/2021	16:13:24	6.73m	31°C	2396V	42/.A	1746 kW	0 kvar	1.00 FP	90.1 Yo	144. Vex	139. Aex	1392.86 MW/h
9	11/12/2021	16:16:24	6.73m	31°C	2398V	443.A	1810 kW	0 kvar	1.00 FP	90.3 Yo	144. Vex	139. Aex	1392.95MW/h
10	11/12/2021	16:19:24	6.75m	31°C	2394V	433.A	1756kW	23 kvar	1.00 FP	49.8 %	145. Vex	140. Aex	1393.04MW/h
11	11/12/2021	16:22:24	6.76m	31°C	2399V	430.A	1755 kW	19 kvar	1.00 FP	49.9 %	145. Vex	140. Aex	1393.13 MW/h
12	11/12/2021	16:25:24	6.79m	31°C	2399V	430.A	1794kW	0 kvar	1.00 FP	90.2 Yo	145. Vex	140. Aex	1393.21 MW/h
13	11/12/2021	16:28:24	6.79m	31°C	2360V	435.A	1770kW	0 kvar	1.00 FP	90.3 Yo	144. Vex	139. Aex	1393.27 MW/h
14	11/12/2021	16:31:24	6.80m	31°C	23601V	425.A	1754 kW	18 kvar	1.00 FP	49.7%	145. Vex	140. Aex	1393.39 MW/h
15	11/12/2021	16:34:24	6.80m	31°C	2361V	434. A	1772kW	0 kvar	1.00 FP	49.8 %	145. Vex	140. Aex	1393.47 MW/h
16	11/12/2021	16:37:24	6.83m	31°C	23601V	4276. A	1791 kW	0 kvar	1.00 FP	49.9 %	145. Vex	140. Aex	1393.57 MW/h
17	11/12/2021	16:40:24	6.82m	31°C	23601V	428. A	1751 kW	0 kvar	1.00 FP	49.8 %	145. Vex	140. Aex	1393.66 MW/h
18	11/12/2021	16:43:24	6.81m	31°C	23602V	4276. A	1752 kW	0 kvar	1.00 FP	49.6 %	145. Vex	140. Aex	1393.71 MW/h
19	11/12/2021	16:46:24	6.82m	31°C	23602V	430.A	1762 kW	0 kvar	1.00 FP	49.7%	145. Vex	140. Aex	1393.81 MW/h
20	11/12/2021	16:49:24	6.84m	31°C	23602V	440. A	1780 kW	0 kvar	1.00 FP	49.7%	146. Vex	141. Aex	1393.92MW/h

Fonte: Autoria Própria

O processamento de cada imagem com 28 informações levou em torno de 11 segundos, totalizando aproximadamente 130 horas de processamentos das imagens coletadas gerando mais de 1,09 milhões de dados brutos preenchidos na planilha.

4.2.2 Limpeza e Tratamento de dados

Com os dados brutos planilhados a primeira necessidade foi realizar a limpeza dos dados, pois ao ser convertido a imagem em texto, muitos dados retornaram com as suas unidades de medidas, conforme estão no supervisório.

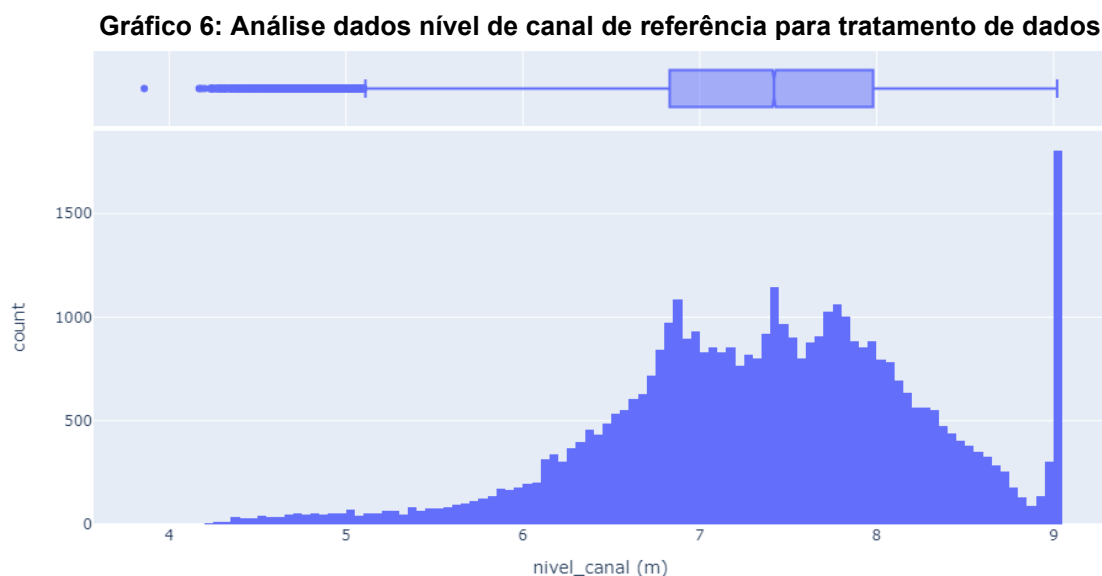
Também, por se tratar de imagens vindas de capturas de telas do supervisório, muitas vezes os operadores saíam das telas principal, minimizando a tela ou fazendo outras configurações, capturando imagens inúteis da coleta, transformando-se em informações inúteis na planilha.

Nesta última situação e em casos que os dados não foram preenchidos na planilha, como os dados são sequenciais, podendo ser verificado o anterior e o próximo, foi realizado a estimação por meio da média entre os valores para preenchimento dos dados não úteis, desde que os dados obtivessem uma sequencial. Em casos como horário, dia, temperatura e geração acumulada, foi seguido a lógica sequencial.

Já os pontos de dúvidas nos dados da planilha, foram verificados em imagem individuais, buscando pelo dia e horário da foto e tratados manualmente. Para esclarecimento neste item, como a *software Tesseract OCR* para o Python é um leitor de caractere por imagem, dependendo da imagem ele pode interpretar os dados de forma equivocada, como por exemplo, um número “7” com a letra “T” ou um “1” com um “l” ou até mesmo um “0” pelo “O”. Assim se fez necessário detectar os padrões e verificações para ajuste nos dados.

Outro ponto tratado foi a verificação das amplitudes de cada variável, para verificar se não extrapola do que foi apresentado na Seção 4.1. Neste momento se fez necessário avaliar graficamente cada variável bem como os dados descritivos, verificando se houveram *outliers* apresentados em cada dado.

Como exemplo desta análise, considera-se os 41.898 pontos observados dos dados do “Nível do Canal”, com os dados preenchidos e limpos para esta avaliação. Utilizando a linguagem e bibliotecas de programação em Python, obtêm o Gráfico 6 que apresenta o *boxplot* na parte superior e o histograma bem como os dados do *boxplot* em Tabela 7.



Fonte: Autoria Própria

Pelo gráfico e tabela e seus limites já apresentado - inferior de 3,80 e superior de 9,10 – vemos que os dados mesmo apresentando *outliers* estão dentro da amplitude estipulada, estando adequados para avaliação da operação.

Tabela 7: Dados boxplot apresentado no Gráfico 6

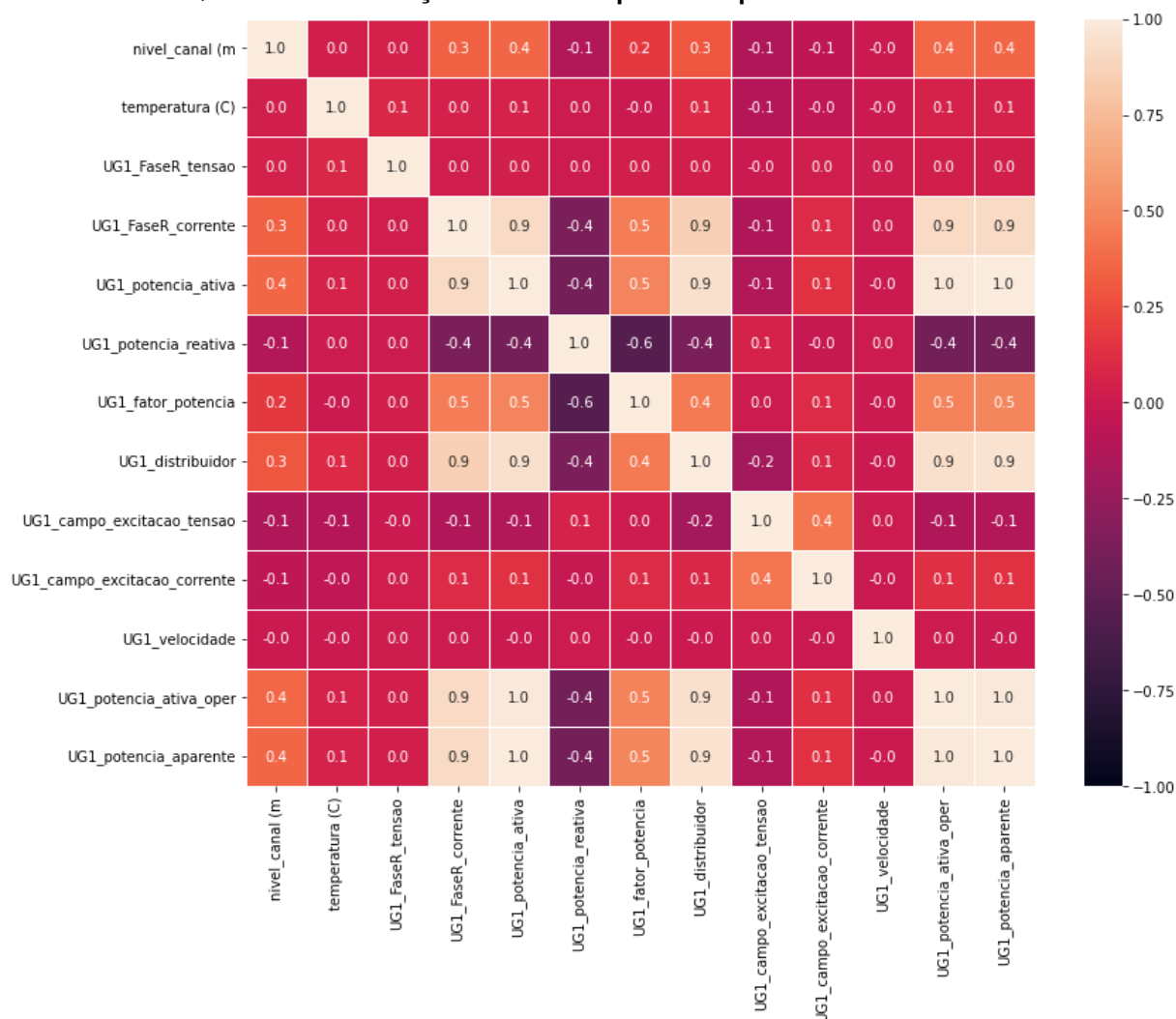
Dados Boxplot	Valor (metros)
Mínimo Extremo (<i>Outlier</i>)	3,86
Mínimo	5,11
1º Quartil	6,83
Mediana	7,42
3º Quartil	7,98
Máximo	9,02

Fonte: Autoria Própria

Para todas as variáveis numéricas, diferente de zero, foram considerados as avaliações acima citadas para verificação e ajuste dos dados. As variáveis que possuem dados zerados são consideradas que as turbinas não estão em operação, assim, não são considerados no tratamento e, nestas condições as variáveis das unidades geradoras estarão zeradas quando as turbinas estiverem paradas.

Por fim, foi realizado teste de correlação de Pearson verificando as correlações moderadas e fortes, positivas e negativas. O Quadro 12 apresenta os valores e mapa de cores com as correlações realizadas entre as variáveis tratadas. Neste caso citado, são as variáveis da Unidade Geradora 1 (UG1) com o nível do canal e a temperatura.

Quadro 12: Correlação de Pearson para UG1 para dados tratados



Fonte: Autoria Própria

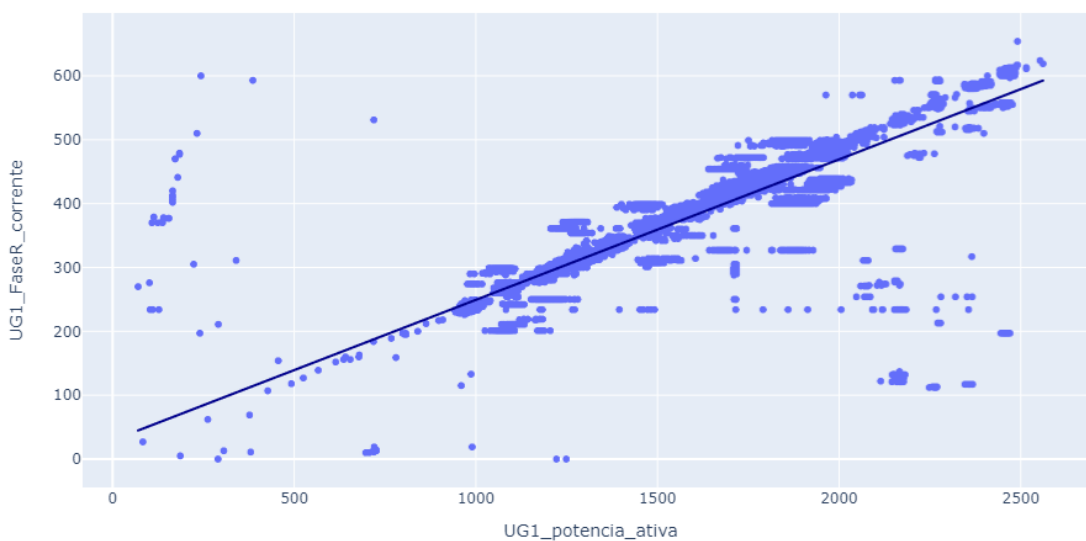
Com as correlações feitas, é considerado as correlações acima de módulo de 0,5, para realizar a conferência dos dados coletados dentro das possíveis dispersões, focando neste momento, somente em verificação de dados.

Como exemplo a esta verificação realizada, vê-se que na correlação a variável “UG1_FaseR_Corrente” e “UG1_potência ativa” possuem uma correlação de +0,9. Assim, é realizado o Gráfico 7, gerando a dispersão entre as duas variáveis com uma linha de tendência linear para a verificação.

O ponto de verificação dos dados é realizado manualmente aos dados coletados fora da concentração de dados junto a linha de tendência, verificando se houve falha de coleta ou se são dados reais que devem ser considerados. Em casos que houve diferença no valor, foram ajustados para maior precisão com a realidade coletada.

Assim se fez para todos os dados com correlação maior que módulo de 0,5 e o mesmo caso para a UG2.

Gráfico 7: Gráfico dispersão para verificação e tratamento de dados



Fonte: Autoria Própria

No final da limpeza, verificação e tratamento dos dados, obteve-se um total de 1.173.144 de dados possíveis úteis para estratificação dos dados.

4.2.3 Estratificação dos dados

Nesta seção, foram organizados, calculados e separados os dados para facilitar e melhorar a avaliação de operação dos dados tratados.

Os dados para estudo foram estratificados para a melhor avaliação, organizando os dados por conjuntos geradores e pelo sistema, sendo assim, os dados tratados foram estão divididos por conjunto gerador (UG1 e UG2) e pela soma do sistema.

Retomando

a

Tabela 5 e Tabela 6, observa-se rupturas de coletas entre alguns dias, devido a falha do programa de coleta de imagens. Para facilitar a avaliação da série temporal, foi criado um agrupador dos dias sequenciais onde considera somente o período dos dias e tempo coletado, evitando avaliação de datas que não foram coletados os dados. Foram separados como:

- Agrupador 1: 12/11/2021 a 17/11/2021 (2.503 observações)
- Agrupador 2: 18/11/2021 a 27/11/2021 (2.018 observações)
- Agrupador 3: 26/11/2021 a 27/11/2021 (397 observações)
- Agrupador 4: 06/12/2021 a 11/12/2021 (2.393 observações)
- Agrupador 5: 18/12/2021 a 30/12/2021 (5.593 observações)
- Agrupador 6: 03/01/2022 a 15/01/2022 (5.878 observações)
- Agrupador 7: 20/01/2022 a 10/03/2022 (23.115 observações)

Para avaliar se a turbina está ou não ativa, foi adicionada uma coluna chamada “UG1_Ativa” e outra “UG2_Ativa”, para indicar se a turbina está ativa, com valor 1, ou não está ativa, no valor 0. Estes dados são verificados juntos a “Potência_Ativa”, pois se este possuir valor maior que 0 kW a turbina está ativa.

Outro ponto é a altura de queda de água que deve ser ajustada de acordo com os dados coletados do nível do canal, utilizando regra de três entre a topografia prática (25,14 m) e valor de referência (8,75 m), criando uma variável chamada “Queda_Efetiva”.

Neste contexto, foi criada uma variável chamada “Taxa_Queda” que busca verificar a tendência do canal adutor, como por exemplo, se está enchendo ou esvaziando. É calculado de acordo com a queda atual subtraindo a anterior.

E, para compreender o sistema como um todo é criada uma variável de soma chamada de “Total_Potencia”, onde totaliza a potência ativa instantânea das duas unidades geradoras, gerando assim a potência total do sistema.

4.2.4 Avaliação estatística dos dados coletados

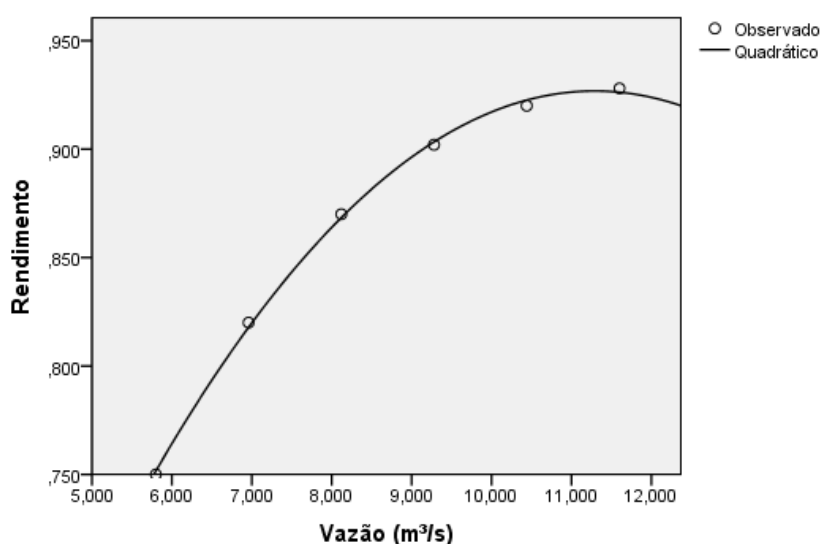
Esta seção foi separada em mais duas seções. Na primeira, com a avaliação estatística dos dados dos equipamentos e na segunda seção, a avaliação dos dados coletados do supervisor e estratificados.

4.2.4.1 Dados Equipamentos

Para os dados tabelados e apresentados sobre rendimento da turbina e do gerador houve a necessidade, para o avanço do estudo, de verificar e gerar funções matemáticas dos rendimentos para dar suporte ao modelo de operação. O mesmo se aplica para os dados de vazão em relação ao distribuidor e queda efetiva, informados.

Para os dados da turbina, foi realizado uma regressão linear entre a vazão e o rendimento da turbina para encontrar a melhor curva que se encaixa aos dados recebidos pelo fabricante.

Gráfico 8: Curva de rendimento Turbina



Fonte: Autoria Própria

O Gráfico 8 apresenta os pontos da Tabela 1, no qual foi realizada a regressão linear, considerando como variável independente a vazão (m^3/s) e a dependente como o rendimento da turbina (%).

Verificou-se que o melhor modelo que se encaixa aos pontos é o quadrático, com o coeficiente de determinação R^2 de 0,999, demonstrando que mesmo com a pouca quantidade de pontos informados a curva que se ajusta é aceitável.

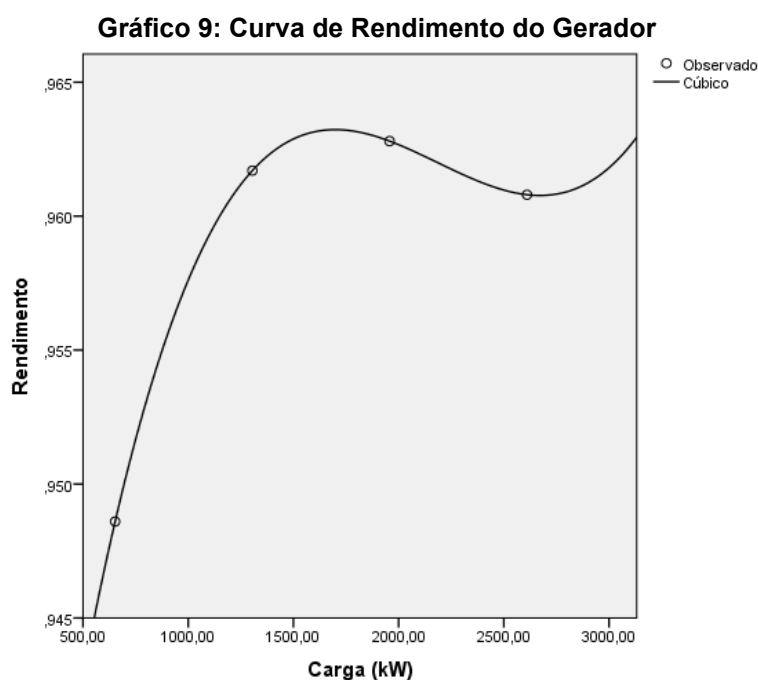
Aceitando a melhor curva da regressão linear quadrática obtêm-se a equação (2) como equação de cálculo de rendimento da turbina através da vazão, em m^3/s . Esta formulação aceita valores dentro da amplitude permitida pelo fabricante, ou seja, o valor de vazão permitido está entre $4,64m^3/s$ (40% da vazão

nominal) e 11,60m³/s (100%, vazão nominal) possuindo uma tolerância 5%, para cima do máximo permitido.

$$n_t = 0,186 + 0,131.q - 0,006.q^2$$

(2) Autoria Própria

Para obter a curva de rendimento do gerador, também é gerado a regressão linear, como apresentado no Gráfico 9.



Fonte: Autoria Própria

Para esta regressão linear foi considerado como variável independente a carga em kW e como dependente o rendimento do gerador. A curva que melhor se ajustou foi a cúbica, com o coeficiente de determinação R² de 1,00, demonstrando que mesmo com a pouca quantidade de pontos informados o modelo é aceitável.

Aceitando a curva de regressão linear cúbica, obtêm-se a equação (3), sendo que p_t é a potência de transmitida da turbina para o gerador. Esta formulação atende até o valor de 2.610 kW dada da potência turbina para a carga do gerador.

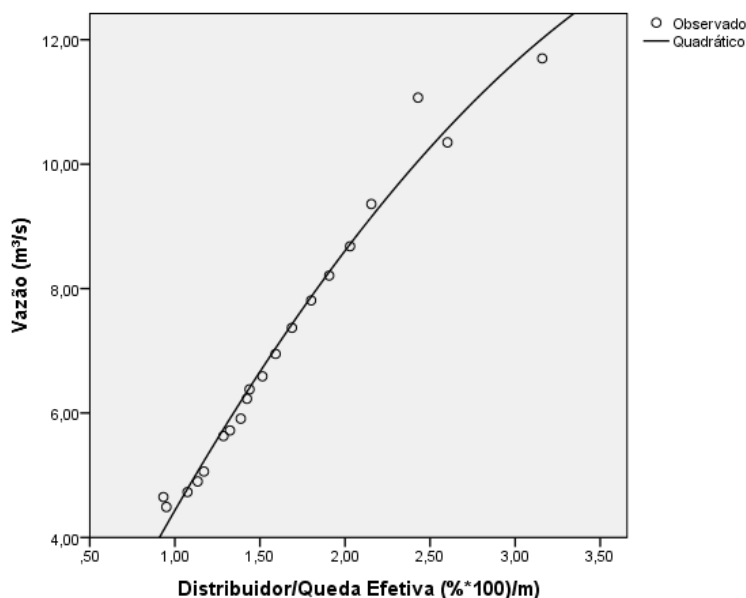
$$n_g = 0,915 + 7,27.10^{-5}.p_t - 3,50.10^{-8}.p_t^2 + 5,34.10^{-12}.p_t^3$$

(3) Autoria Própria

Além do rendimento do conjunto gerador, também houve a necessidade de determinar uma formulação para calcular a vazão a partir das informações

disponíveis e coletadas. Para obter a curva de vazão, foi considerado a relação entre o distribuidor e a queda efetiva, através dos dados apresentados na Tabela 3. Neste caso, também foi realizado uma regressão linear quadrática, como apresentada no Gráfico 10.

Gráfico 10: Curva da Vazão em relação ao Distribuidor e Queda Efetiva



Fonte: Autoria Própria

Para esta regressão linear foi considerada como independente a razão entre o distribuidor multiplicado por 100 dividido pela queda efetiva e a dependente a variável vazão. A curva quadrática, se ajustou com o coeficiente de determinação R^2 de 0,98, demonstrando que com a quantidade de pontos informados o modelo é aceitável.

Aceitando a melhor curva de regressão linear quadrática, obtêm-se a equação (4), sendo que $d_{supervisório}$ é o valor disponibilizado pelo supervisório do distribuidor na turbina (o valor já é dado multiplicado por 100) e h_1 é a queda efetiva calculada, através dos dados coletados ou instantâneos.

$$q = -0,882 + 5,886 * \left(\frac{d_{supervisório}}{h_1}\right) - 0,571 * \left(\frac{d_{supervisório}}{h_1}\right)^2$$

(4) Autoria Própria

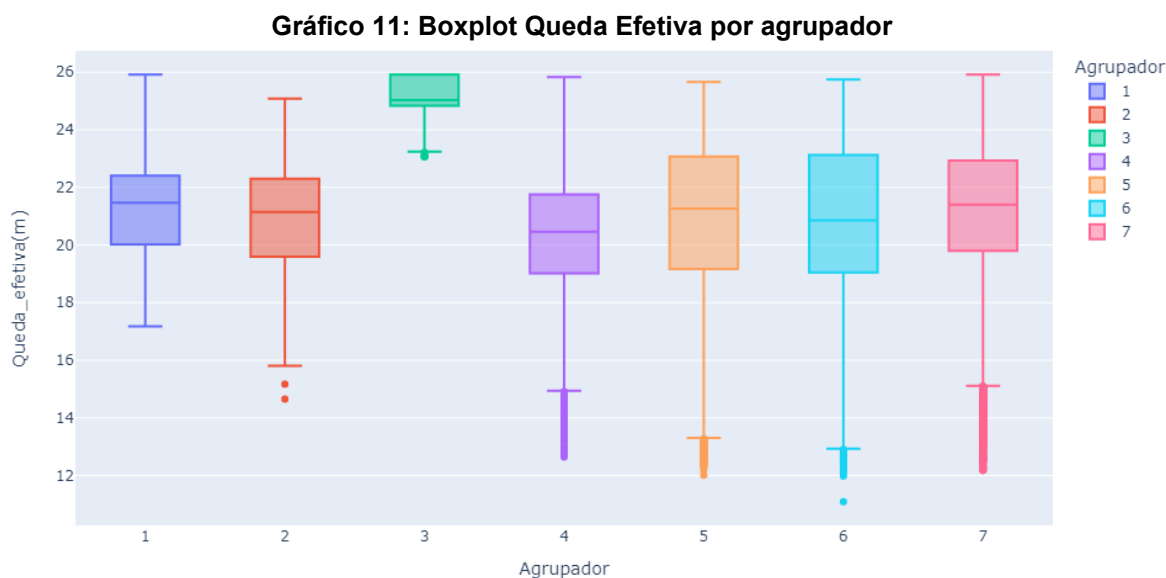
As informações acima foram utilizadas para o desenvolvimento do modelo proposto e verificação entre as condições teóricas e de projeto com os dados coletados da operação da usina.

4.2.4.2 Dados Coletados Supervisório

Nesta seção, são apresentadas as avaliações e os resultados relevantes de todas as variáveis que foram coletadas.

O primeiro passo foi realizar a avaliação individual de como é feita a operação do canal, através da “Queda Efetiva” e a soma das potências ativas do sistema. Verificando as oscilações do canal e a soma das potências, observou-se a interferência direta na capacidade de gerar potência e como consequência, o impacto à eficiência de operação.

Avaliando todos os agrupadores de datas criados, verificou-se oscilações representativas na queda efetiva durante a operação, variando de 12 a 26 metros. O Gráfico 11 apresenta um *boxplot* dos dados da queda efetiva por agrupador.



Fonte: Autoria Própria

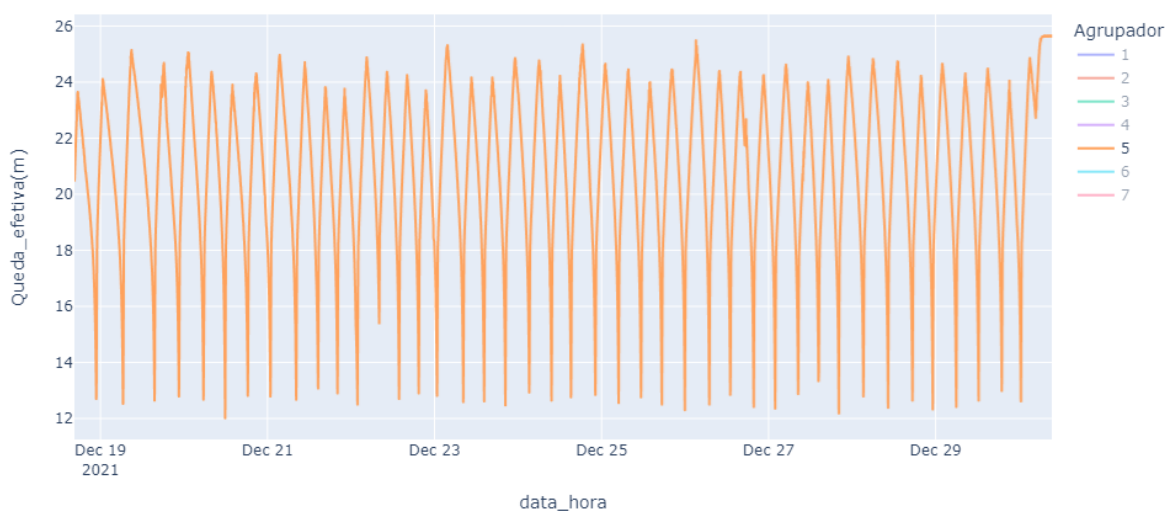
Verifica-se que há oscilações significativas dentro do canal durante o processo de operação, considerando que, em casos teóricos possui duas situações: (i) pela formulação teórica a potência calculada tem proporção direta a queda efetiva em que ao baixar o canal, menor a potência gerada e vice versa e, (ii) a turbina e o

projeto dimensionam que o ideal para a operação é a queda efetiva seja próximo a 25 metros onde que nessas condições, fogem das condições determinadas em projeto da usina e da turbina e que a operação do canal para a geração, em sua maioria, estão com os dados concentrados abaixo do valor determinar, gerando possíveis perdas na geração.

Em busca para entender melhor a operação da usina através do canal, foi avaliado temporalmente os dados de cada agrupador, observando dois padrões mais recorrentes: (i) quando ativa e desativa a turbina com frequência, para encher o canal (ou subir o nível do canal) e (ii) quando, pelo menos uma das turbinas estão ativas por um longo tempo, mas tendo oscilações entre as potências permitidas e a queda efetiva.

Para o primeiro caso, pode-se visualizar este padrão nos dados do Agrupador 5. O Gráfico 12 apresenta uma série temporal com os dados da queda líquida, verificando que existe ciclos entre alto e baixo na queda efetiva algumas vezes durante o dia.

Gráfico 12: Série temporal queda efetiva do agrupador 5



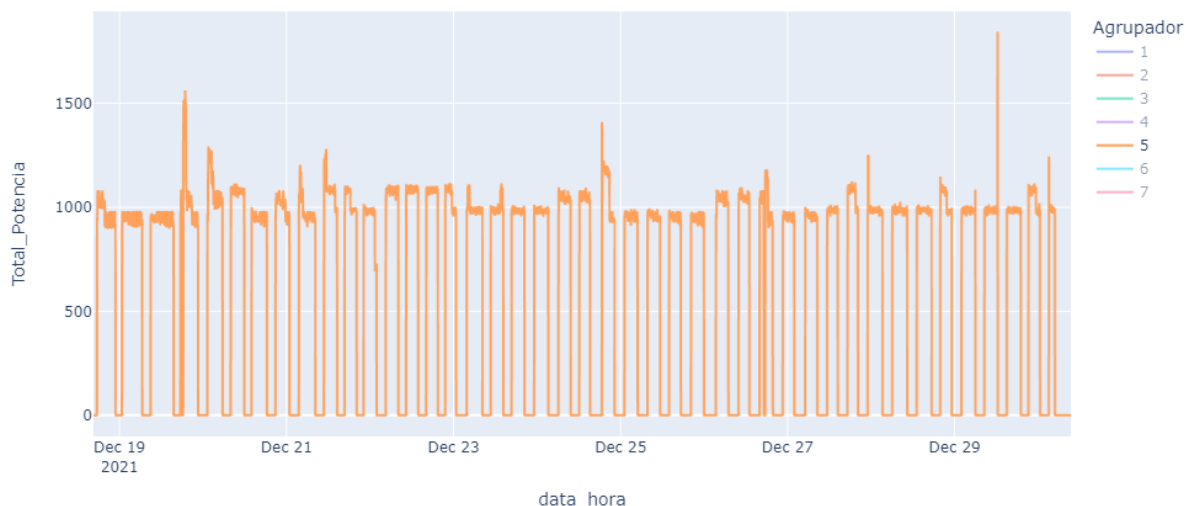
Fonte: Autoria Própria

Para melhor interpretação destas condições de ciclo do canal, é apresentado o Gráfico 13, na mesma série temporal, onde verificamos a potência no momento ativo da turbina também oscilando entre próximo a mínima permitido pelo fornecedor para uma turbina (1000 kW) e desativando a turbina, quando chega a 0kW.

Nestas condições, verificou-se que pela operação é ativo uma turbina na sua capacidade mínima e consumido a água do canal adutor nesta potência. Este momento de ativar a turbina são nos picos apresentados no Gráfico 12. Considera-

se que a queda diminui, pois, a vazão do rio é menor que a vazão consumida pela turbina, na mínima permitida. Com isto, depois de baixar a queda efetiva do canal até um certo limite, é determinado pela operação a inativar a turbina para encher o canal e fazer o mesmo ciclo onde que, nesta série de dados, foi de aproximadamente 12 dias consecutivos. Ao longo dos demais agrupadores de datas, observa mais padrões como este.

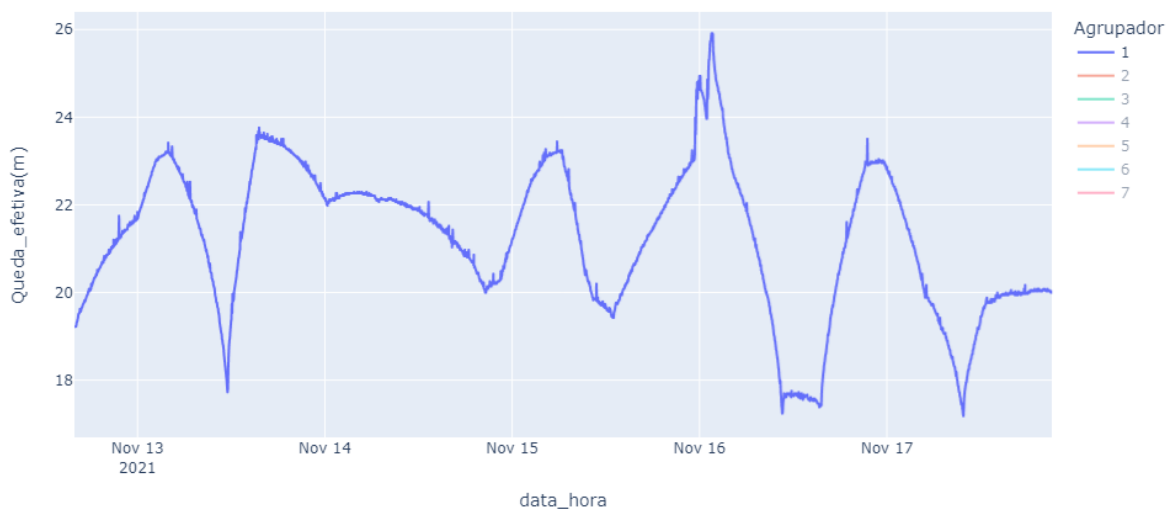
Gráfico 13: Série temporal total potência do agrupador 5



Fonte: Autoria Própria

Para o segundo caso típico do canal, observou-se a operação em condições que permitem alterar as potências durante a operação, e neste caso, é considerado que a vazão do rio é pelo menos maior que a mínima permitida para uma turbina.

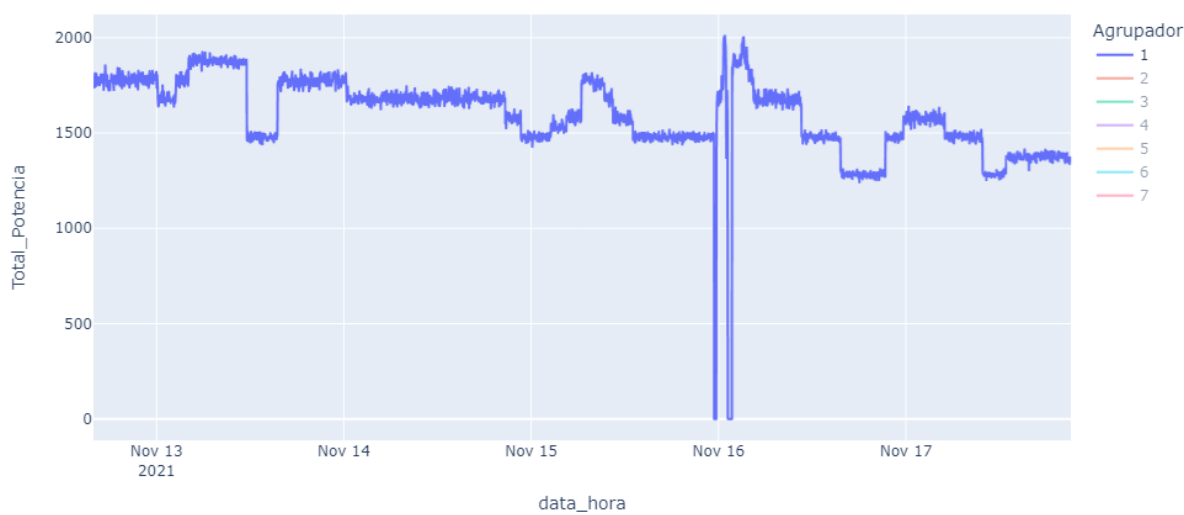
Gráfico 14: Série temporal queda efetiva do agrupador 1



Fonte: Autoria Própria

O Gráfico 14 apresenta as oscilações temporais do nível do canal, como amostra os dados do Agrupador 1 durante a operação, no qual verificou-se de imediato que possui em sua maioria valores abaixo da ideal esperada em projeto, mesmo tendo condições de alterar as potências para a turbina e tentar manter a queda líquida mais próximo aos 25 metros de projeto.

Gráfico 15: Série temporal total potência do agrupador 1



Fonte: Autoria Própria

Para compreender a operação nestas condições, verifica-se pelo Gráfico 15 que ao passar do tempo, é alterada as potências do conjunto gerador acima da mínima de uma turbina. Ao comparar o Gráfico 14 e o Gráfico 15, verifica-se o impacto que uma alta potência, por exemplo, pode gerar de queda no canal e por conseguinte gera uma necessidade na operação de uma ruptura da potência para tentar corrigir o nível do canal, que fica muito baixo.

Como exemplo, no Gráfico 15 tem-se no início do dia 13 de novembro três aumentos de potência consecutivos dada pela a operação e quando chega ao terceiro aumento, de aproximadamente 1.800 kW, observa-se no mesmo instante no Gráfico 14 que o nível do canal começa a diminuir até a metade do dia 13, saindo de 23 para 18 metros de queda efetiva, aproximadamente. Neste momento da menor baixa, observa-se que há uma ruptura de potência para 1500 kW e a partir daí, o canal começa a subir novamente. Este ciclo continua em diversos pontos e é visto nos demais dias subseqüentes e nos outros agrupadores.

Fonte: Autoria Própria

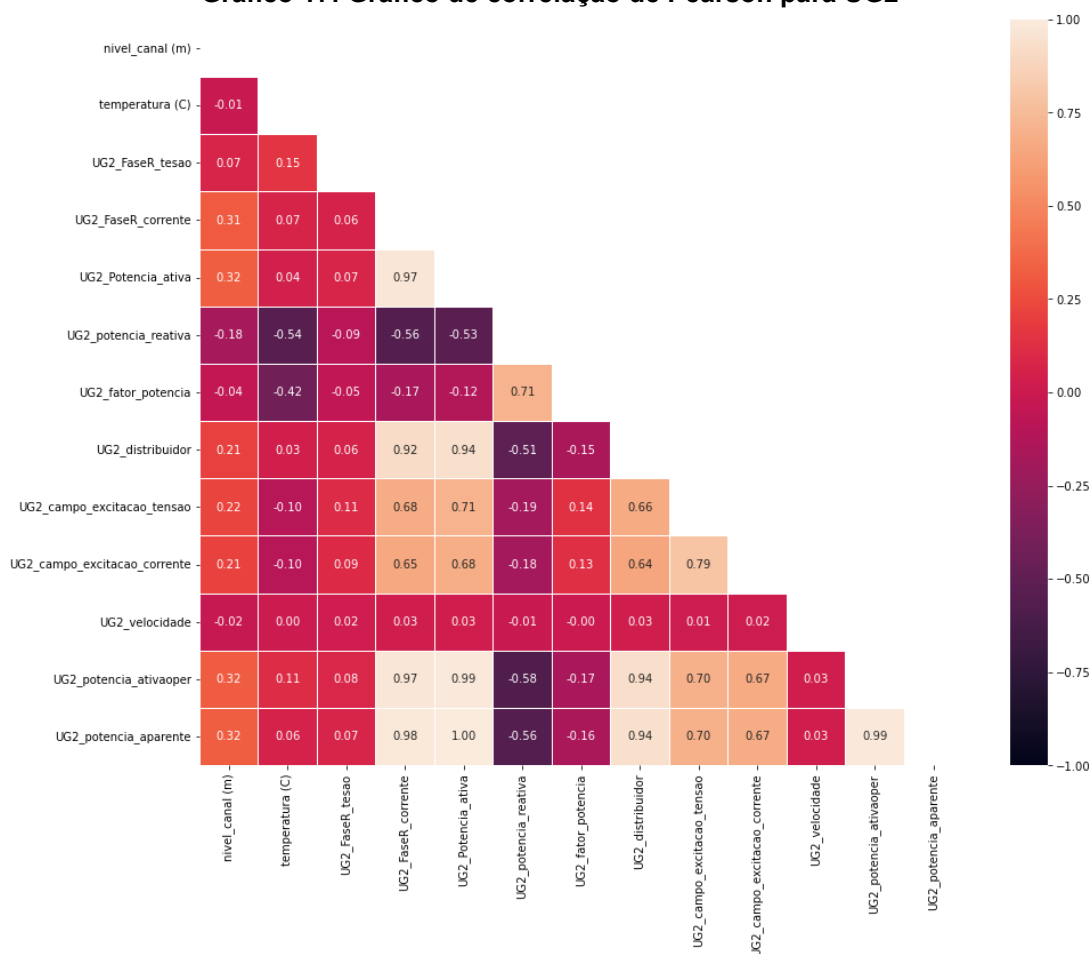
Abaixo são apresentadas as correlações fortes, acima de 0,9 da correlação de Pearson, sendo:

- I. “UG1_Potencia_ativa” e “UG1_FaseR_corrente”: 0,91
- II. “UG1_potencia_ativa_oper” e “UG1_FaseR_corrente”: 0,91
- III. “UG1_potencia_aparente” e “UG1_FaseR_corrente”: 0,91
- IV. “UG1_distribuidor” e “UG1_potencia_ativa”: 0,94
- V. “UG1_potencia_ativa_oper” e “UG1_potencia_ativa”: 0,99
- VI. “UG1_potencia_aparente” e “UG1_potencia_ativa”: 0,99
- VII. “UG1_potencia_ativa_oper” e “UG1_distribuidor”: 0,94
- VIII. “UG1_potencia_aparente” e “UG1_distribuidor”: 0,95

Assim, verifica-se que as potencias estão fortemente correlacionadas entre si, ao distribuidor e a corrente, de forma positiva para a UG1.

Ao mesmo caso para a Unidade Geradora 2, gera-se as correlações de Pearson apresentada no Gráfico 17.

Gráfico 17: Gráfico de correlação de Pearson para UG2



Fonte: Autoria Própria

Abaixo são apresentadas as correlações fortes, acima de 0,9 da correlação de Pearson, sendo:

- I. “UG2_Potencia_ativa” e “UG2_FaseR_corrente”: 0,97
- II. “UG2_distribuidor” e “UG2_FaseR_corrente”: 0,92
- III. “UG2_potencia_ativa_oper” e “UG2_FaseR_corrente”: 0,97
- IV. “UG2_potencia_aparente” e “UG2_FaseR_corrente”: 0,98
- V. “UG2_distribuidor” e “UG2_potencia_ativa”: 0,94
- VI. “UG2_potencia_ativa_oper” e “UG2_potencia_ativa”: 0,99
- VII. “UG2_potencia_aparente” e “UG2_potencia_ativa”: 1,00
- VIII. “UG2_potencia_ativa_oper” e “UG2_distribuidor”: 0,94
- IX. “UG2_potencia_aparente” e “UG2_distribuidor”: 0,94

Assim, verifica-se que as potencias estão fortemente correlacionadas entre si, ao distribuidor e a corrente, de forma positiva para a UG2.

Avaliando entre as correlações fortes da UG1 e da UG2, observa-se que todas as correlações das mesmas variáveis são fortes para cada turbina, mas acima de 0,9, existe uma exceção para o distribuidor e da corrente que para a UG1 foi de 0,86 e para a UG2 0,92. Entretanto, verifica-se que as características para as duas turbinas geram correlações muito próximas às mesmas variáveis.

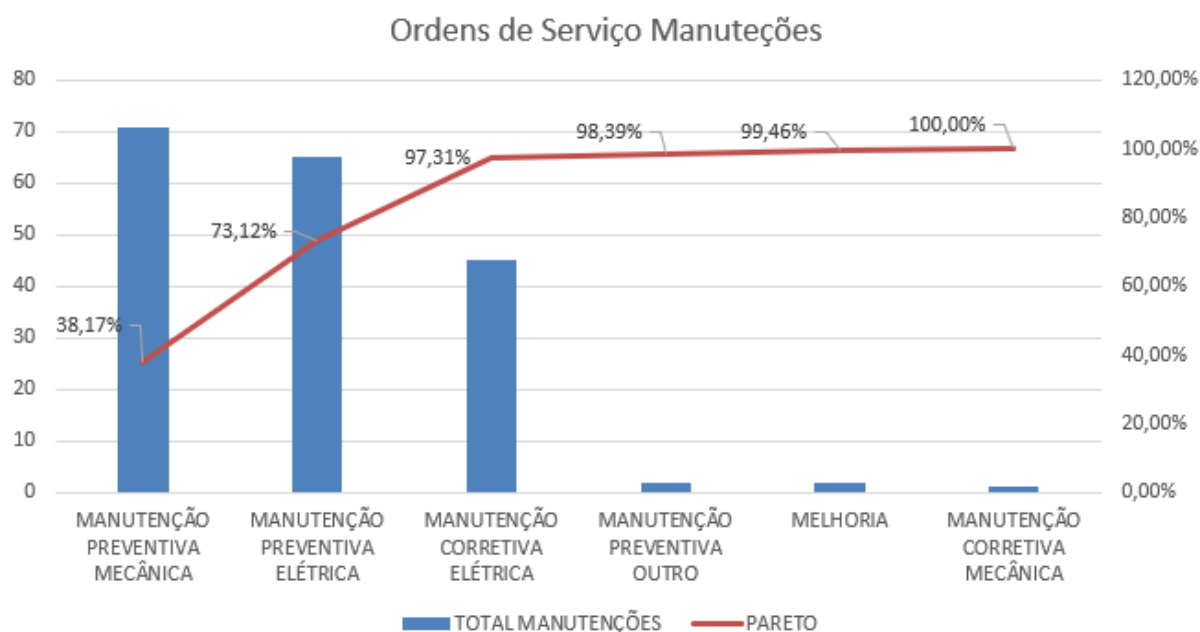
Verificando se existe causalidade nas correlações vê-se que as potências são dependentes entre si pois a potência ativa é a potência do sistema, a potência ativa do operador é a potência dada de referência dado pelo operador para obter o valor da potência ativa mais próximo e a potência aparente é a potência ativa menos as perdas no sistema. Para este caso, entende-se que não há causalidade entre os dados de potência.

Para o distribuidor em correlação com as potências, vê-se pela formulação teórica da potência hidráulica que possui dependência direta com a vazão. Como o distribuidor é um regulador de vazão para geração dentro da turbina, obtêm-se que o a potência e o distribuidor não possuem causalidade.

Por fim, entre a corrente com as potências verifica-se que, fisicamente a conversão de potência mecânica em eletricidade é preciso das variáveis de tensão e corrente. Como a tensão é determinada pelo fabricante como fixa em 2300 Volts e não possui correlação com as demais, a variável corrente deve compensar a variação da potência, assim, não obtêm causalidade dos dados apresentados neste caso, também.

Com os dados das correlações, voltou-se a formulação teórica e observou-se que a vazão tem maior correlação do que a nível do canal para a potência ativa, mas como já verificado, ao diminuir o nível do canal geramos perdas de volume de água pela necessidade de compensação na vazão, para que possa manter a potência ativa do sistema.

Através dos dados gerais da usina, verificou-se também sobre as ordens de serviços relacionado as manutenções necessárias para a usina no período. O Gráfico 18 apresenta o gráfico de barras, com a proporção acumulada de cada barra, apresentado que as Manutenções Preventiva Elétrica e a de Mecânica geram as maiores manutenções com 73,12%, das ordens de serviço para manutenção.

Gráfico 18: Pareto para Ordem de Serviço Manutenções Usina

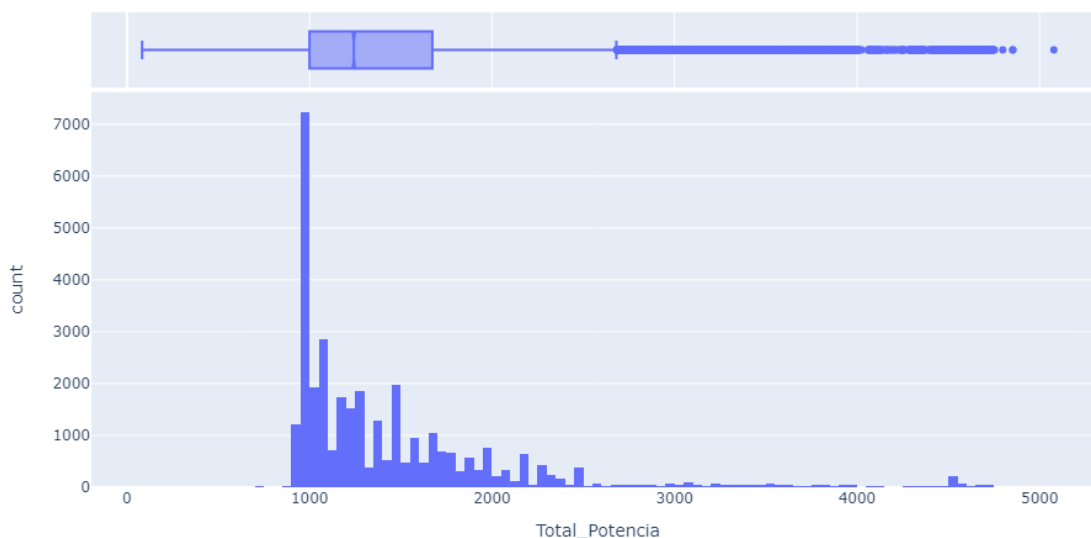
Fonte: Autoria Própria

Avaliando os dados de operação coletados junto aos de ordem de serviço, indica que, no período estudado, houve paradas de máquinas forçada devido a manutenção totalizando 4,59% do tempo estudado.

É verificado, a partir dos dados de potência ativa do sistema, qual o fator de capacidade, ou seja, a partir da potência total instalada, quanto de energia é realmente é gerada da usina no período estudado.

Ao verificar os dados, observou-se que pelo menos uma turbina foi estava ativa em 81,97% do tempo total de coleta de dados. Como exemplo, a cada 100 dias, 81,97 dias pelo menos uma das turbinas estava ativa. Entretanto, não é possível generalizar este índice pois a análise deveria ser feita em maior período do que este estudo, o valor dado somente como referência e para comparativos do período estudado.

Sobre o tempo de operação da usina, foi gerado Gráfico 19 que apresenta um histograma e um *boxplot* da soma das potências ativa de cada turbina, gerando o total de potência ativa do sistema para ser verificado qual frequência de potência estava ativa no sistema.

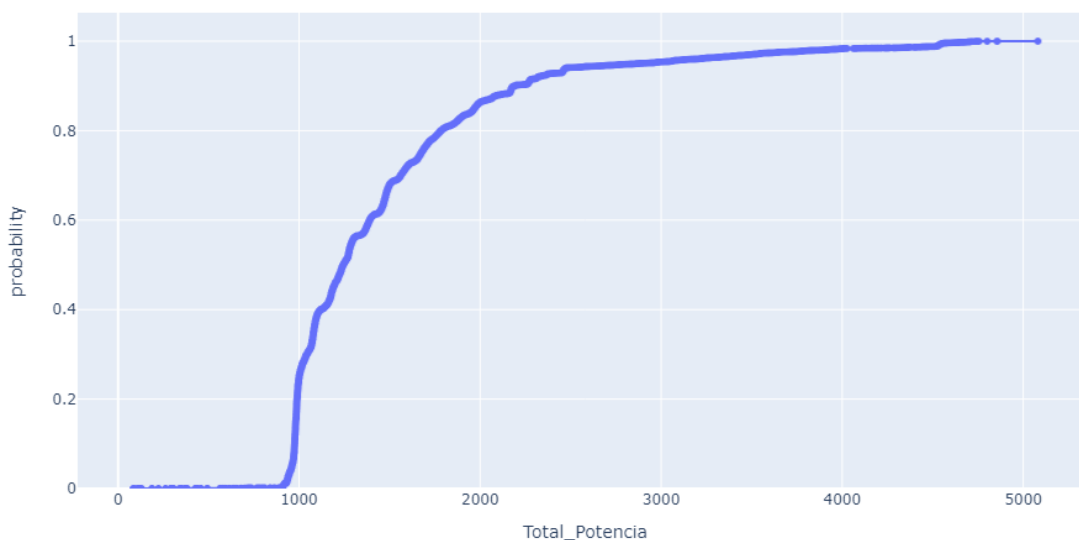
Gráfico 19: Histograma e Boxplot para Potência Total do Sistema

Fonte: Autoria Própria

Verifica-se que a maior concentração de potências ativas na usina é próxima a 1000 kW e verifica-se a mediana dos dados está em 1.243 kW. Considera-se no momento da mediana a utilização de somente 24% do sistema instalada de 5.000 kW, o que gera a necessidade de um acompanhamento pela empresa devido a concentração de dados mais próximo a mínima para somente uma turbina.

Visando entender a probabilidade de qual potência pode acontecer no período estudado, obtêm-se o Gráfico 20 que apresenta a probabilidade de um valor acontecer, através dos dados coletados.

Neste caso, observou-se que para valores abaixo de 2.181 kW, obtêm-se a probabilidade empírica de pouco mais de 90%, disto acontecer. Ao considerar este valor de forma a generalizar o sistema, teríamos a verificação de que o fator de capacidade da usina seria de ~43,5% para menos, com 90% de probabilidade disto acontecer, que seria menos da metade da dada a capacidade instalada da usina, o que indicaria ser baixo dado ao investimento de instalação.

Gráfico 20: Distribuição acumulada Potência Total do Sistema e sua probabilidade

Fonte: Autoria Própria

Assim, com as análises relevantes ao estudo realizadas, compreende-se como satisfatórios os dados coletados não havendo necessidade ajustar ou adicionar os dados para este estudo.

4.3 Estudo teórico

Para o estudo teórico foram considerados os dados de projeto definidos antes da instalação da usina e apresentado uma formulação matemática com base as informações teóricas de projeto da usina para conseguinte comparação ao modelo desenvolvido para uso na operação da usina. Esta fase do estudo foi realizada em paralelo com a coleta de dados de operação da usina.

4.3.1 Coleta de Informações de projeto sobre a usina

Esta seção apresenta as informações teóricas definidas pelas informações técnicas dos equipamentos e das de projeto, realizado antes da instalação da usina. As informações foram recebidas através de documentos da usina e de e seus fornecedores.

Para a primeira informação, foi considerado a queda bruta definida em projeto para a usina. Foi avaliado o projeto civil de topografia realizada pela empresa de engenharia civil, em que se verificou que pelo projeto de instalação da usina, foi

definido que queda bruta é de 26,70 metros. Para definição da queda líquida o projeto considera que no percorrer da água no canal adutor ocorram perdas hidráulicas em seu circuito, assim, a empresa de civil determinar uma perda de carga de 4%. Assim sendo, a queda líquida na câmara de carga de projeto é definida com 25,63 metros.

Através da vazão histórica da bacia hidrográfica da região, considerando a área de drenagem do rio da usina, verificou-se no projeto que a média de vazão de projeto é considera com o valor de 22,51 m³/s ou 11,255m³/s para cada turbina.

A empresa definiu no projeto um valor de indisponibilidade forçada de 3% da disponibilidade de geração. Este fator é considerado como uma margem segurança para a parada de geração de energia por algum tipo de falha ou quebra quando há disponibilidade física para a geração.

Para fins de projeto da usina, determinou-se um índice fixo de rendimento do conjunto gerador (turbina e gerador), devido as perdas mecânicas e elétricas. Este valor é estipulado em projeto em 88,30%, ou seja, a cada 1000 kW de potencial de geração somente 883,00 kW são gerados para envio a rede elétrica, de acordo com o projeto.

Como os períodos de chuva e vazão são variáveis ao logo do tempo, a empresa determina um fator de capacidade de 55%. Assim, dentro da capacidade instalada, somente 55% da capacidade instalação serão utilizados para a geração de energia, em média anual.

A Tabela 8 apresenta um resumo dos valores teóricos coletados do projeto executivo da usina para a condições teóricas de operação.

Tabela 8: Resumo Informações Teóricas de Projeto

Informação de Projeto	Valor	Unidade
Queda Líquida	25,63	m
Vazão Média Histórica	22,51	m ³ /s
Fator Indisponibilidade forçada	3,00	%
Rendimento médio	88,30	%
Conjunto Gerador		
Fator de Capacidade	55,00	%

Fonte: Autoria Própria

4.3.2 Condições teóricas de operação

Para efeito teórico e de projeto, foi considerado os dados gerais informados, a equação (1) e as informações da Tabela 8. Para que ocorra a operação da usina, o operador precisa somente informar a “Potência Set Operador”, que poderia ser embasada na equação (5) onde estão substituídas as constantes da gravidade, densidade e o rendimento.

$$p = \frac{(9,807).(999).(0,8830).h_1.q}{10^3}$$

(5) Autoria Própria

O rendimento aplicado no valor 0,887 equivale ao rendimento teórico do conjunto gerador (turbina e gerador). O resultado é dado em potência ativa em kW, por isto o valor é dividido por 10^3 , conversão de W para kW, mas ainda são dependentes das variáveis de queda líquida e vazão instantâneas que são geradas instantâneas durante a operação.

4.4 A relação entre os dados práticos e a teoria

Esta seção apresenta a relação dos dados entre a teoria (formulação e dados de projeto) com os dados práticos coletados e avaliados, comparando os pontos entre o projeto determinado para a usina e a atual forma de operação.

A primeira comparação refere-se a queda líquida da usina. Para as condições de projeto estes dados são tratados como uma constante, que na prática é avaliado que durante a operação da usina, o canal adutor possui uma grande variação durante a operação do sistema, gerando perdas de potência em relação ao projeto determinado.

Outro ponto é o rendimento do conjunto gerador. Para o projeto e para a teoria é considerado também como uma constante do sistema, mas de acordo com os dados prático do fornecedor da turbina e do gerador há variações para cada caso. No caso da turbina, o rendimento é dado de acordo com a vazão permitida pelo sistema e para o gerador o rendimento é dado pela transferência de potência da turbina para o gerador. Assim, o rendimento é variável, de acordo com as condições físicas momentâneas.

Avaliando os dados de vazão, pode-se inferir que a potência de projeto é considerada a média da vazão histórica do rio, dada pela empresa de projeto e, mesmo não possuindo diretamente as informações da vazão, verifica-se pelo distribuidor da turbina que a vazão é variável para a turbina, onde a automação ajusta de acordo com a potência set dada pelo operador e assim, varia as condições para a turbina para a geração.

Com relação ainda a vazão e o nível do canal, obtêm-se que a vazão do rio interfere diretamente no nível do canal e na possibilidade de operação da turbina que, dependendo da quantidade de água disponível no canal, pode-se liberar mais ou menos vazão para a turbina e assim, efetivar a potência solicitada pela operação.

Para a indisponibilidade de máquina, verificou-se que no período estudado houve uma parada de máquina forçada em 4,59% do tempo estudado, que para o projeto definido foi determinado um valor de 3%, estando acima do projeto definido para a usina, gerando mais tempo de parada do que o esperado.

Por fim, verificou-se o fator de capacidade da usina. Para o projeto é esperado que haja 55% de fator de capacidade, porém, avaliando os dados do período estudado, onde a probabilidade de acontecer um pouco acima de 90% é a potência 2.181kW em contraponto com a potência instalada de 5.000 kW, instalada. Considerando esses dados, verifica-se que o fator de capacidade no maior volume de dados será de 43,62%, com base no período estudado e não de 55% do projetado.

4.5 Avaliação das perdas de geração na operação

Com base nos dados e informações estudadas, pode-se apresentar e resumir as perdas observadas no sistema. Abaixo são apresentadas as possíveis perdas de geração relacionados a operação e ao sistema.

Perda em queda de altura de água, pois ao baixar o nível do canal, têm-se menor capacidade de geração de potência diretamente e, possíveis perdas de rendimento relacionados ao projeto da turbina e conseqüentemente do gerador. Há perdas também nos momentos de oscilações do nível do canal pela operação, gerando perdas de volume de água e inconsistências no sistema gerador.

Há perdas no *startup* das turbinas, pois para poder sincronizar a geração de energia e enviar para a rede elétrica, deve estar em condições permitidas pela concessionária, que nestes casos é necessário iniciar a turbina, consumir água até que o sistema tenha condições de estar estável com a concessionária. Nessa situação, pode-se ter mais perdas nos momentos de utilização da capacidade mínima das turbinas que se não otimizado a operação, poderá perdas nos momentos de reativar a turbina ou em perdas de água no canal.

Ao operar em condições de vazão baixa, devido a condições do rio, a turbina tem perdas de rendimentos para as potências possível a ser gerada e conseqüentemente haverá perdas de rendimento no gerador, conforme visto em curvas de rendimentos.

Há perdas também quando a operação determina uma potência maior que a permitida fisicamente. Verificou-se pela formulação teórica que para o sistema manter uma potência determinada é necessário ajustar a vazão (distribuidor da turbina) ou a queda líquida. Em caso de fixar uma potência, na automação, o distribuidor aumenta a vazão para a turbina tente chegar na potência ativa solicitada, mas se não há condições físicas permitidas, perde-se água que, poderia ser utilizada para uma geração com potência menor e com mais consistência ao nível do canal.

4.6 Desenvolvimento da função matemática para operação

Em busca de apresentar uma referência para a operação em dadas condições da usina momentaneamente e reduzir possíveis perdas no sistema de geração, é proposto um modelo matemático para apoio durante a operação.

Como premissas a esta formulação, têm-se:

- i. Referência teórica da equação (1);
- ii. Rendimento da turbina pela equação (2), considerando o distribuidor como referência de vazão;
- iii. Rendimento do gerador pela equação (3), considerando a potência de referência a potência dada pela turbina, em kW;
- iv. Queda Efetiva é a relação entre a do supervisor de operação (8,75 m) e a real topográfica (25,14 m);

- v. Como não há informações instantâneas de vazão do rio, a turbina já deve estar ativa e sincronizada com a rede elétrica, utilizando o cálculo da vazão através da equação (4) ;
- vi. Densidade da água (999kg/m^3) e aceleração da gravidade ($9,807\text{m/s}^2$) como constantes; e
- vii. Taxa do canal é a verificação da condição atual do canal, considerado que se o canal está subindo a taxa é positiva ou se estiver diminuindo a taxa é negativa, verificando o período anterior em relação ao atual.

Assim, é apresentado abaixo a determinação das variáveis para posterior compilação do modelo.

Para a queda líquida, determina-se que o valor atual dado na operação é a proporção do valor prático multiplicado pelo valor atual do nível do canal dada no supervisorio ($h_{supervisorio}$), assim:

$$h_t = \frac{25,14}{8,75} \cdot h_{supervisorio}$$

(6) Autoria Própria

Para determinação da vazão, é utiliza o valor atual do distribuidor e atual da queda líquida calculada, utilizando a equação (4). Com isto obtêm-se a vazão estimada e atualizada do sistema.

Por fim, para a taxa do canal, é verificado a queda do supervisorio atual menos a queda do supervisorio um período anterior - no caso deste estudo é a cada 3 minutos, devido a coleta de dados, mas pode ser determinado na prática a cada segundo, por exemplo -, onde que se o valor da taxa for positivo indica que o canal está subindo, ou seja, a vazão do rio é maior que consumida pela turbina na geração e vice-versa. Assim, define-se a taxa do canal como:

$$taxa_{canal} = h_{supervisorio_t} - h_{supervisorio_{t-1}}$$

(7) Autoria Própria

onde, o t é o tempo atual e $t-1$ é um tempo anterior.

Com as informações apresentadas, determina-se a equação resumida (8) como sugestão de referência para a operação da potência p (em quilowatt) a ser conferida nas condições imediatas pelo operador, após estabilizado o canal.

$$p = p_t \cdot n_g$$

(8) Autoria Própria

onde p_t é a potência gerada pela turbina dada pela equação (9) e n_g é o rendimento do gerador em relação a potência dada pela turbina.

$$p_t = \frac{(9,807) \cdot (999) \cdot n_t \cdot h_t \cdot q}{10^3}$$

(9) Autoria Própria

Para facilitar o uso das fórmulas, apresenta-se a Tabela 9 indicando as equações e a sua numeração neste estudo, para as condições de acordo com o estado atual da usina:

Tabela 9: Referências de equação para cálculo	
Cálculo Variável	Número Equação de Referência
n_t - Rendimento turbina	(2)
n_g - Rendimento gerador	(3)
q - Vazão na Turbina	(4)
h_t - Queda Líquida	(6)
Taxa do Canal	(7)
p - Potência Ativa	(8)
p_t - Potência Turbina	(9)

Fonte: Autoria Própria

Cabe ressaltar que, os cálculos das formulações apresentadas são considerados para cada turbina e não para o sistema completo devido aos limites dados nos rendimentos da turbina e do gerador.

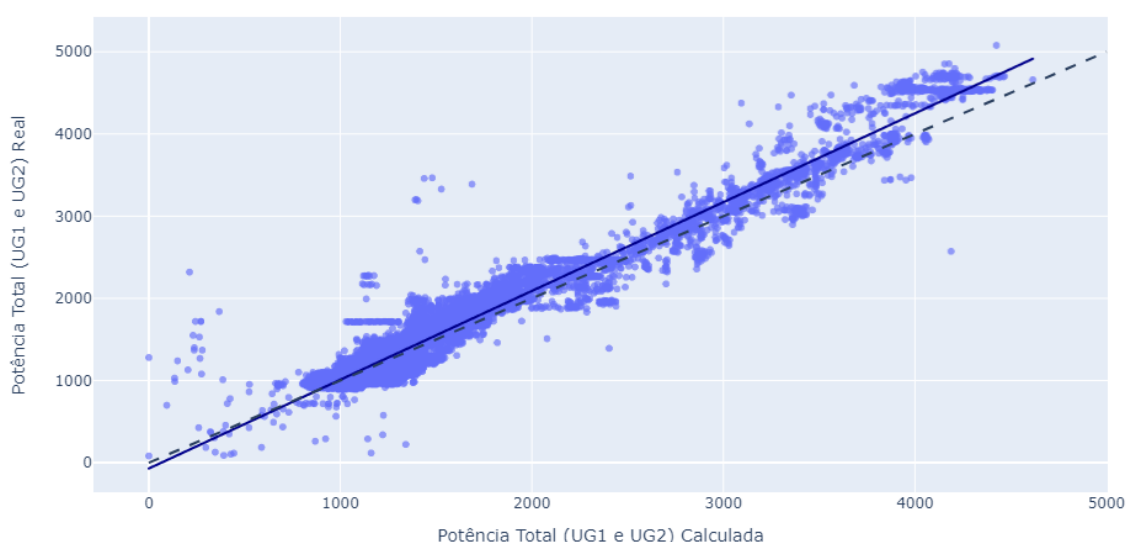
Com as formulações apresentadas acima, realizou-se a verificação da formulação junto aos dados coletados da usina, como forma a qualificar as fórmulas para uso prático.

Para a verificação da formulação da potência com os dados coletados, foram realizados os cálculos individuais para cada instante coletado em planilha, seguido a seguinte rotina:

- I. Cálculo da queda efetiva, pela equação (6), através dos valores dados do nível do canal, dado pelo supervisorio;
- II. Cálculo da vazão pela equação (4) de cada turbina;
- III. Cálculo da potência total de cada turbina, pela equação (8);
- IV. Soma das potências calculadas de cada turbina;
- V. Soma das potências reais de cada turbina, pelos dados coletados;
- VI. Cálculo do erro entre a potência calculada e a potência real coletada;
- VII. Avaliação do erro e verificação da média dos erros entre a potência calculada e a real.

Seguindo a rotina estabelecida para validação para cada instante, gerou-se o Gráfico 21 em que se pode avaliar a relação entre os dados práticos com o cálculo através das fórmulas apresentadas.

Gráfico 21: Regressão para avaliação de verificação de fórmulas



Fonte: Autoria Própria

Os pontos dispersos é a relação entre o valor da soma das potências calculadas da UG1 e UG2 (eixo x) e a soma das potências reais da UG1 e UG2 (eixo y). Observa-se que a linha contínua é a linha de tendência da relação entre os dados gerados no gráfico e a linha tracejada é a linha ideal considerando que os dados reais e calculados devem ser iguais. Pode-se verificar que os valores estão muito próximo entre as linhas.

Ainda para a verificação, é realizado a média dos erros entre o real e calculado e tendo um erro médio de 1,51% ou de 51,5 kW para mais ou para menos onde que, observando o gráfico, quanto mais perto de 1.000 kW na soma das

turbinas, menor é o erro e quanto mais próximo a nominal do sistema de 5.000 kW maior o erro, pelas linhas apresentadas no gráfico.

Considerado o modelo verificado, para que seja aplicável na operação da usina, é apresentado a próxima seção compilando o modelo com a sua forma de utilização.

4.7 Compilação do modelo para operação

Nesta seção é apresentado o modelo de utilização para a operação da formulação matemática proposta na seção anterior.

Para que possa melhorar o processo de operação buscando a eficiência na operação da usina é apresentado a rotina compreendida neste estudo para uso desta formulação na operação, sendo:

- I. Como não há informações de vazão do rio na usina é necessário avaliar inicialmente o nível do canal, verificando se o nível do canal está próximo a nominal de projeto da usina;
- II. Com o nível do canal próximo ao de projeto, inicializa a operação de uma turbina na potência mínima permitida, 1.000 kW;
- III. Após o conjunto gerador estiver sincronizado com a rede elétrica, calcula-se a taxa de canal e verifica a sua variação. Neste caso, haverá três opções:
 - a. Para taxa do canal igual a zero: Manter a potência ativa atual, pois não há variação no canal e conseqüentemente a vazão utilizada pela turbina é próxima à vazão do rio;
 - b. Para taxa do canal menor que zero: O canal está reduzindo o volume de água onde a turbina está consumindo mais água que o rio consegue disponibilizar.
 - i. Neste caso, se a turbina estiver com potência igual a 1000 kW, o sistema deverá trabalhar por batelada, ou seja, consumir a água do canal até baixar o máximo possível do canal e após desativar a geração, para encher o canal e realizar o ciclo até que a taxa torne a ser positiva ou igual a zero.

- ii. Se a potência ativa for maior que 1.000 kW deverá ser reduzindo a potência até que a taxa do canal esteja próxima a zero ou até retornar o tópico anterior.
 - c. E para taxa de canal maior que zero: permite que seja aumentada a potência ativa. Neste momento, caso a potência ativa seja maior que 2500 kW é necessário acionar a segunda turbina até que a taxa do canal seja próxima a zero com as duas turbinas ativas totalmente ou parcialmente.
- IV. Com a taxa do canal próximo a zero, realiza o cálculo da equação (8) com as variáveis instantâneas do supervisor, verificando se a potência dada para estabilizar o canal é a potência teórica para as condições físicas atuais. Caso não seja, ajusta-se a potência da operação com o valor da potência de resultado pela formulação;
 - V. Durante a operação verifica-se constantemente a taxa do canal e o cálculo de potência retomando o ciclo quando ocorrer a variação na taxa do canal.

Como sugestão à empresa estudada, considera-se significativamente para melhorar o processo de operação, aprimorar o sistema com um conjunto de sensores de vazão do rio para definir diretamente a potência, onde que se a vazão consumida pela turbina e a vazão do rio sejam próximas, evita-se o trabalho de tentativa e erro para zerar o valor da taxa do canal.

Caso a empresa opte por adicionar o sensor de vazão do rio, a rotina IV deverá ser realizada antes da rotina III, facilitando a localizar o ponto onde a taxa do canal é próxima a zero, estabilizando rapidamente o canal, facilitando a operação. Aqui vale o ponto de estudo para melhoria.

Entretanto, a rotina acima é válida para o sistema como um todo, porém é necessário saber quando operar uma ou duas turbinas e assim definir como dividir a potência entre elas. Neste caso, cabe retomar ao Gráfico 8, no qual verificou-se que os melhores rendimentos das duas turbinas são quando a vazão está mais próxima de sua nominal, ou seja, potência de 2.500 kW para cada. Considera-se nesta condição o valor fixo de queda líquida próximo a 25,00 m. Com base nisto, é apresentado a sugestão de regime de operação das turbinas, através da soma das potências ativa calculada de cada turbina. Assim temos que a soma das potências forem:

- I. Abaixo de 1.000 kW: Operar uma turbina em sistema de batelada, esvaziando e enchendo o canal;
- II. entre 1.000 kW a 2.500 kW: Operar somente uma turbina até a sua nominal;
- III. entre 2.500 kW a 3.500 kW: Operar as duas turbinas com potências parciais, buscando a divisão de potências entre si;
- IV. entre 3.500 kW e 5.000 kW: Fixar uma turbina em 2.500 kW e a outra variar a diferença; e
- V. Acima de 5.000 kW: Fixa as duas turbinas em 2.500 kW.

Por fim, outro ponto a ser considerado para este modelo, é buscar na operação manter o máximo possível do canal mais próximo da nominal, evitando perdas excessivas pela falta de queda líquida, principalmente pelo fato do rendimento das turbinas serem dimensionada na nominal de 25 metros de queda líquida.

Através do modelo proposto, busca assim melhorar a referência utilizada para a operação e buscar melhorar a eficiência de geração com as condições permitidas pela usina.

4.8 Limitações do estudo

Nesta seção é apresentado problemas observados no modelo, das avaliações propostas e na condição atual da usina.

Para as condições atuais de operação da usina, verifica-se uma alta variação do canal durante a operação causando pela falta de referências das condições do rio para uso em turbina na potência ideal.

Como a usina é operada remotamente e a central de operação opera outras usinas, os operadores podem não estar atentos constantemente para a geração da usina em questão e em pouco tempo de geração pode ocorrer variações que necessite de ações da operação. Não ter alertas ou referências que podem ser instaladas no supervisão, pode ser uma das causas desta situação.

Outro ponto verificado é a questão do fator de capacidade da usina, estando abaixo da definida em projeto para o período estudado, entretanto, pode ser uma

causalidade do período estudado e que pode ser compensado nos outros meses, porém é um ponto a ser observado pela empresa, devido ao volume de investimento e a responsabilidade do dimensionamento dada pela empresa de projeto.

Em relação a indisponibilidade de projeto verificou-se no estudo que o tempo de parada é maior que o previsto, gerando atenção necessárias nas manutenções da usina que pode também ser gerada por estar pouco tempo em operação e houver necessidade de ajustes para a confiabilidade de geração.

Em relação ao modelo proposto para a operação, alguns problemas podem ser gerados durante a execução. Relacionado aos cálculos para a taxa do canal, pode existir um excesso de cálculos de tentativas até conseguir estabilizar o canal e para assim determinar a potência ideal. No momento da prática aplicada, o modelo também pode gerar erros maiores em casos não observados nos dados coletados assim, o modelo necessita de teste e ajustes para refinar os resultados do modelo proposto. Como não há a informação de vazão do rio, são necessárias muitas tentativas para conseguir chegar à potência ideal onde a taxa do canal tende a zero.

Outro ponto, também, da não verificação do modelo proposto na prática, são as possíveis dificuldades e acertos do modelo na utilização prática do operador, pois com estas informações, o modelo poderá ser melhorado e facilitado para a operação assim, reforça a necessidade de realizar testes do modelo para a efetivação prática.

Enfim, há a dificuldade de generalizar o modelo e as avaliações devido a ser estudados somente um período de operação da usina bem como o pouco tempo que a usina está ativa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a conclusão desta pesquisa, são apresentados na primeira seção os fatores estudados através da compilação dos dados e o que interferem na geração de energia elétrica e por fim, na última seção, proposições de novos estudos ao redor do tema tanto para a confiabilidade da operação quanto ao aproveitamento energético.

5.1 Sobre os Fatores estudados

Com forma a agrupar o fim deste estudo atendendo o objetivo principal, apresenta-se um compilado dos dados estudados bem como responder à pergunta do que interfere efetivamente na operação da usina.

5.1.1 Compilação de dados

Inicialmente este estudo observou a operação geral da usina instalada e assim coletou dados disponibilizados pela usina em tempo real, dados técnicos de projeto no empreendimento e de seus equipamentos. Foi tratado, estratificado e analisado estatisticamente os dados.

Verificou as fortes relações dos dados e em conjunto com a teoria determinando quais variáveis importaram para melhor avaliação. Observando a operação pelos dados, gerou-se a necessidade de apresentar um modelo de referência para a operação da usina e apresentar a forma de aplicação modelo na prática de operação, buscando os melhores rendimentos.

Sugere-se, para a empresa melhorar a operação da usina, a instalação de sensores de vazão do rio, antes a entrada da tomada d'água, reduzindo interferências do canal adutor a vazão natural do rio. Com este, a operação tende a ter uma confiabilidade da operação maior e mais imediata por ter as condições naturais do rio, reduzindo maiores oscilações do canal adutor e assim aumentar os rendimentos entre as condições físicas permitidas e o sistema instalado.

5.1.2 O que interfere na geração operação

Voltando ao fundamental e as avaliações realizadas, finaliza-se este estudo indicando que a queda líquida e a vazão são os itens que mais interferem na geração, onde estas informações deve estar o mais próximo a nominal determinada em projeto do empreendimento.

Para a operação e por ser tratar de uma usina de fio de água, a importância é alta em controlar o nível do canal para manter as condições técnicas estabelecidas suficiente do conjunto gerador.

Com queda líquida definida, é necessário avaliar a vazão permitida pelo rio para a determinar a potência para a geração de energia, onde verificou-se que os rendimentos da turbina e do gerador, são melhores nas nominais para este estudo.

Em suma para este estudo, para a operação à eficiência da geração é manter o canal mais alto possível de forma a oscilar o mínimo possível buscando a vazão mais próximo de cada turbina a sua nominal, assim é possível extrair os melhores rendimentos esperados para a geração.

5.2 Proposição de novos estudos

Através da pesquisa e a experiência adquirida, cabe a esta monografia apresentar os possíveis estudos que podem ser realizadas ao redor do tema apresentado neste estudo. São divididas em duas seções, onde a primeira apresenta possíveis novos estudos na área de operação de usinas hidrelétricas de pequeno porte e na segunda apresenta possíveis estudos para aproveitamento energético onde as usinas estão instaladas.

5.2.1 Para confiabilidade da operação

Para ter maior qualidade dos dados e assim, obter um modelo a generalizar o uso na usina, o aumento do período de coleta de dados tende a abranger possíveis novos pontos de verificação.

Para comprovar o modelo matemático proposto, realizar estudo com ferramentas e testes para comprovar o modelo na prática e assim para que possa

verificar a possibilidade de ser abrangente a usinas intituladas como fio de água ou outras características similares.

Possivelmente, cabe um estudo para simulação computacional para comprovar hipóteses aqui apresentadas e para criar cenários de acordo com possibilidade de vazões ou de chuvas locais históricas e registradas pela usina, tanto na fase de projeto da usina quanto em modernizações.

Para melhorar os resultados, propõe adicionar e estudar sensores de vazão no rio e de pressão para determinar melhor os resultados apresentados realizando estudo específicos relacionado a geração da usina e os dados de projeto.

Realizar estudo de outras perdas possíveis dentro do sistema entre a água até a energia elétrica entregue na concessionária. As perdas possíveis observadas podem ser: (i) perdas de carga em grade fina, (ii) em condutos ou (iii) em transições e as (iv) perdas elétricas no sistema depois do gerador até a rede elétrica, como em transformadores de tensão ou em subestação.

Estudos em pesquisa operacional buscando minimizar as perdas ou até mesmo maximizar a geração de energia ou os rendimentos do conjunto gerador propondo novos arranjos de operação ou até mesmo de equipamentos.

Estudos voltados ao planejamento e programação de manutenção preventivas ou preditivas em usinas hidrelétricas, apresentando as peças de reposição, melhorias e/ou como tratar as condições corretivas.

E, a um nível de programação, realizar estudos de operação automatizadas ou até mesmo por inteligência artificial, reduzindo ou retirando a operação manual tentando prever condições para a operação da usina.

5.2.2 Para aproveitamento energético local

Buscando o aproveitamento energético local, pode-se realizar estudos para melhor determinar o projeto de implantação, verificando a influência de dados históricos como vazão, dados de chuvas, entre outros.

Estudos com sistemas híbridos adicionando condições de operação com geração solar com hídrica ou eólico com hídrica ou até mesmo com o conjunto hídrico, solar e eólico buscando maior receita com a infraestrutura já existente, como

por exemplo, ter menores custos de implantação em redes elétricas para sistema compartilhados.

Estudos para minigeração utilizando vazão de canais adutores ou até mesmo transbordo de barragem ou vazões sanitárias.

Com as sugestões, este estudo propõe estas opções para melhorar os estudos para pequenas hidrelétricas e assim buscar eficiências de operação e aproveitamentos energéticos.

REFERÊNCIAS

ALGIERI, Angelo; ZEMA, Demetrio Antonio; NICOTRA, Angelo; ZIMBONE, Santo Marcello. Potential energy exploitation in collective irrigation systems using pumps as turbines: a case study in Calabria (southern Italy). **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 257, 120538, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120538>.

ANAGNOSTOPOULOS, John S.; PAPANTONIS, Dimitris E.. Optimal sizing of a run-of-river small hydropower plant. **Energy Conversion And Management**, [S.L.], v. 48, n. 10, p. 2663-2670, out. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2007.04.016>.

ARCE, A.; OHISHI, T.; SOARES, S.. Optimal dispatch of generating units of the Itaipu hydroelectric plant. **Ieee Transactions On Power Systems**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 154-158, 2002. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/59.982207>.

ABRITTA, Ramon; PANOEIRO, Frederico; HONÓRIO, Leonardo; SILVA JUNIOR, Ivo; MARCATO, André; GUIMARÃES, Anapaula. Hydroelectric Operation Optimization and Unexpected Spillage Indications. **Energies**, [S.L.], v. 13, n. 20, p. 5368, 15 out. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en13205368>.

BORKOWSKI, Dariusz; MAJDAK, Marek. **Small Hydropower Plants with Variable Speed Operation—An Optimal Operation Curve Determination**. **Energies**, [S.L.], v. 13, n. 23, p. 6230, 26 nov. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en13236230>.

BORTONI, Edson C.; BASTOS, Guilherme S.; SOUZA, Luiz E.. Optimal load distribution between units in a power plant. **Isc Transactions**, [S.L.], v. 46, n. 4, p. 533-539, out. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2007.03.003>.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. Outubro de 2021. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYz>

kNTQ1MTc1NjM2liwidCI6ljQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9. Acesso em: 04 de outubro de 2021.

BRASIL. Eletrobrás. **Potencial Hidrelétrico em cada Estágio por Região (valores em MW)**. Dezembro de 2018. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/AreasdeAtuacao/geracao/sipot/Potencial%20Hidrel%C3%A9trico%20Brasileiro%20por%20Regi%C3%A3o%20-%20Dezembro%202018.pdf>. Acesso em: 04 de outubro de 2021.

BRASIL. Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). **2ª Revisão Quadrimestral das Projeções da demanda de energia elétrica do Sistema Internacional Nacional 2021-2025**. Rio de Janeiro, EPE, 2021. Disponível em: http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/NT%202%C2%AA%20Revis%C3%A3o%20Quadrimestral%202020_final.pdf. Acesso em: 04 de outubro de 2021.

CHACÓN, Miguel Crespo; DÍAZ, Juan Antonio Rodríguez; MORILLO, Jorge García; MCNABOLA, Aonghus. Hydropower energy recovery in irrigation networks: validation of a methodology for flow prediction and pump as turbine selection. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 147, p. 1728-1738, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.119>.

CHEN, Ran-Fan; CHANG, Kuo-Chi; CHU, Kai-Chun; CHANG, Fu-Hsiang; WANG, Hsiao-Chuan; HSU, Tsui-Lien; LIU, Jia-Jing. **Optimal Operation of Reservoir Power Generation Based on Improved Grey Wolf Algorithm**. *Advances In Intelligent Systems And Computing*, [S.L.], p. 987-996, 2021. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-69717-4_92

CHUANGANG, Li; CHANGMING, Ji; BOQUAN, Wang; MINGHAO, Liu; RONGBO, Li. The Hydropower Station Output Function and its Application in Reservoir Operation. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 31, n. 1, p. 159-172, 20 out. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-016-1516-2>.

DANCEY, Christine.; REIDY, John. **Estatística Sem Matemática para Psicologia**. Grupo A, 2018. 9788584291434. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788584291434/>. Acesso em: 29 nov. 2021.

DRUZHININ, A. A.; ORLOVA, E. S.; VOLKOV, A. V.; PARYGIN, A. G.; NAUMOV, A. V.; RYZHENKOV, A. V.; VIKHLYANTSEV, A. A.; IOUKAL, J.; SEDLAŘ, M.; KOMÁREK, M.. Enhancing the Efficiency of Small-Scale and Microhydroturbines Using Nature-Imitation Technologies for the Development of Autonomous Energy Sources. **Thermal Engineering**, [S.L.], v. 66, n. 12, p. 944-952, dez. 2019. Pleiades Publishing Ltd. <http://dx.doi.org/10.1134/s0040601519120024>.

DUMUR, D.; LIBAUX, A.; BOUCHER, P.. **Robust RST control for «Basse-Isère» run-of-river cascaded hydro-electric plants**. 2001 European Control Conference (Ecc), [S.L.], p. 1952-1957, set. 2001. IEEE. <http://dx.doi.org/10.23919/ecc.2001.7076208>.

ELSEVIER. **Scopus®**: Banco de dados de resumos e citações organizados por especialistas, c2021. Base de Dados. Disponível em: <https://www.elsevier.com/pt-br/solutions/scopus>. Acesso em: 29 de nov de 2021.

FIELD, Andy. **Descobrimo a Estatística Usando o SPSS**. Grupo A, 2020. 9788584292011. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788584292011/>. Acesso em: 29 nov. 2021.

GITHUB. GitHub, c2021. Spyder-IDE. Disponível em: <https://github.com/spyder-ide/spyder>. Acesso em: 29 de nov de 2021.

GONÇALVES, F.V.; COSTA, L.H.; RAMOS, H.M.. Best economical hybrid energy solution: model development and case study of a wds in portugal. **Energy Policy**, [S.L.], v. 39, n. 6, p. 3361-3369, jun. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.031>.

GUO, Baoling; BACHA, Seddik; ALAMIR, Mazen; MOHAMED, Amgad. **Variable speed micro-hydro power generation system: Review and Experimental results**. Symposium de Génie Electrique, France, v. 1, hal-02981922, jul 2018. Hal Arquivos-Ouvertes.fr. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02981922>

GUZMÁN, Vladimir J. Alzamora; GLASSCOCK, Julie A.; WHITEHOUSE, Ferris. Design and construction of an off-grid gravitational vortex hydropower plant: a case study in rural peru. **Sustainable Energy Technologies And Assessments**, [S.L.], v. 35, p. 131-138, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2019.06.004>.

HAIR, Joseph. F.; BLACK, William. C.; BABIN, Barry. J.; ANDERSON, Rolph. E.; TATHAM, Ronald. L. **Análise Multivariada de Dados**. Grupo A, 2009. 9788577805341. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788577805341/>>. Acesso em: 25 nov. 2021.

HAMMID, Ali Thaeer; SULAIMAN, Mohd Herwan. **Optimal Long-Term Hydro Generation Scheduling of Small Hydropower Plant (SHP) using Metaheuristic Algorithm in Himreen Lake Dam**. Matec Web Of Conferences, [S.L.], v. 131, p. 04017, 2017. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201713104017>.

HIDALGO, Ieda G.; FONTANE, Darrell G.; F., Secundino Soares; CICOGNA, Marcelo A.; LOPES, João E. G.. Data Consolidation from Hydroelectric Plants. **Journal Of Energy Engineering**, [S.L.], v. 136, n. 3, p. 87-94, set. 2010. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)ey.1943-7897.0000024](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000024).

HOSSEINI, S.M.H.; FOROUZBAKHSH, F.; RAHIMPOOR, M.. Determination of the optimal installation capacity of small hydro-power plants through the use of technical, economic and reliability indices. **Energy Policy**, [S.L.], v. 33, n. 15, p. 1948-1956, out. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2004.03.007>.

IVANCHENKO, I. P.; PLATOV, V. I.. Operating experience and suggestions on reconstruction of the turbines of the Dnepr-I hydroelectric station. **Hydrotechnical Construction**, [S.L.], v. 24, n. 6, p. 389-397, jun. 1990. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf01433315>.

JIANG, Zhiqiang; WU, Wenjie; QIN, Hui; HU, Dechao; ZHANG, Hairong. Optimization of fuzzy membership function of runoff forecasting error based on the optimal closeness. **Journal Of Hydrology**, [S.L.], v. 570, p. 51-61, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.009>.

JOIN, Cédric; ROBERT, Gérard; FLIESS, Michel. Model-Free Based Water Level Control for Hydroelectric Power Plants. **Ifac Proceedings Volumes**, [S.L.], v. 43, n. 1, p. 134-139, 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.3182/20100329-3-pt-3006.00026>.

KALDELLIS, J.K.; VLACHOU, D.s.; KORBAKIS, G.. Techno-economic evaluation of small hydro power plants in Greece: a complete sensitivity analysis. **Energy Policy**, [S.L.], v. 33, n. 15, p. 1969-1985, out. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2004.03.018>.

KARAMARKOVIĆ, Vladan M.; NIKOLIĆ, Miloš V.; KARAMARKOVIĆ, Rade M.; KARAMARKOVIĆ, Miodrag V.; MARAĀLEVIĆ, Miljan R.. Techno-economic optimization for two SHPPs that form a combined system. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 122, p. 265-274, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.081>.

KARLIS, Athanassios D; PAPADOPOULOS, Demetrios P. A systematic assessment of the technical feasibility and economic viability of small hydroelectric system installations. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 20, n. 2, p. 253-262, jun. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0960-1481\(99\)00113-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0960-1481(99)00113-5).

KOUGIAS, Ioannis; AGGIDIS, George; AVELLAN, François; DENIZ, Sabri; LUNDIN, Urban; MORO, Alberto; MUNTEAN, Sebastian; NOVARA, Daniele; PÉREZ-DÍAZ, Juan Ignacio; QUARANTA, Emanuele. Analysis of emerging technologies in the

hydropower sector. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 113, p. 109257, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2019.109257>

KUMAR, Arun; SAINI, R.P.; GANDHI, B.K.; SRIVASTAVA, R.K.; CHANDRA, Pradeep; DUBEY, A.K.. Experiences in discharge measurements at Small Hydropower Stations in India. **Flow Measurement And Instrumentation**, [S.L.], v. 69, p. 101605, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101605>.

LEGUIZAMÓN, Sebastián; AVELLAN, François. Computational parametric analysis of the design of cross-flow turbines under constraints. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 159, p. 300-311, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.187>.

LI, Huanhuan; MAHMUD, Md Apel; ARZAGHI, Ehsan; ABBASSI, Rouzbeh; CHEN, Diyi; XU, Beibei. Assessments of economic benefits for hydro-wind power systems: development of advanced model and quantitative method for reducing the power wastage. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 277, p. 123823, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123823>.

MAYOR, Beatriz; RODRÍGUEZ-MUÑOZ, Ignacio; VILLARROYA, Fermín; MONTERO, Esperanza; LÓPEZ-GUNN, Elena. The Role of Large and Small Scale Hydropower for Energy and Water Security in the Spanish Duero Basin. **Sustainability**, [S.L.], v. 9, n. 10, p. 1807, 6 out. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su9101807>.

MING, Bo; LIU, Pan; GUO, Shenglian; CHENG, Lei; ZHOU, Yanlai; GAO, Shida; LI, He. Robust hydroelectric unit commitment considering integration of large-scale photovoltaic power: a case study in china. **Applied Energy**, [S.L.], v. 228, p. 1341-1352, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.019>.

MISHRA, Mukesh Kumar; KHARE, Nilay; AGRAWAL, Alka Bani. Small hydro power in India: current status and future perspectives. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 51, p. 101-115, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.075>.

MISIUK, Mykola; PODOROZHNA, Tetiana; BALYNSKA, Olha; KUCHER, Oleg; BURLAKOV, Oleksandr. **Development of small hydroenergy in Ukraine and its legal regulation**. E3S Web Of Conferences, [S.L.], v. 154, 06003, 2020. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202015406003>.

MONTANARI, R.. Criteria for the economic planning of a low power hydroelectric plant. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 28, n. 13, p. 2129-2145, out. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0960-1481\(03\)00063-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0960-1481(03)00063-6).

NIADAS, Ioannis A.; MENTZELOPOULOS, Panos G.. Probabilistic Flow Duration Curves for Small Hydro Plant Design and Performance Evaluation. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 22, n. 4, p. 509-523, 2 jun. 2007. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-007-9175-y>.

NIEBUHR, Cm; VAN DIJK, M; BHAGWAN, Jn. Development of a design and implementation process for the integration of hydrokinetic devices into existing infrastructure in South Africa. **Water Sa**, [S.L.], v. 45, n. 3, p. 434-446, 31 jul. 2019. Academy of Science of South Africa. <http://dx.doi.org/10.17159/wsa/2019.v45.i3.6740>.

NIKOLIĆ, Miloš V.; KARAMARKOVIĆ, Rade M.; KARAMARKOVIĆ, Miodrag V.; KARAMARKOVIĆ, Vladan M.. Retrofit of a settling basin of a small hydropower plant. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 236, 112118, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112118>.

NISHI, Yasuyuki; SUZUO, Ryouta; SUKEMORI, Daichi; INAGAKI, Terumi. Loss analysis of gravitation vortex type water turbine and influence of flow rate on the turbine's performance. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 155, p. 1103-1117, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.186>

OSIPCHUK, E N; NIKITIN, V M; ABASOV, N V. Possibilities of enhancing the efficiency of the Angara cascade of hydroelectric power plants. **Journal Of Physics:**

Conference Series, [S.L.], v. 1652, p. 012022, out. 2020. IOP Publishing.
<http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1652/1/012022>.

PAISH, Oliver. Small hydro power: technology and current status. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 6, n. 6, p. 537-556, dez. 2002. Elsevier BV.
[http://dx.doi.org/10.1016/s1364-0321\(02\)00006-0](http://dx.doi.org/10.1016/s1364-0321(02)00006-0).

PEÑA, Rafael; MEDINA, Aurelio; ANAYA-LARA, Olimpo; MCDONALD, James R.. Capacity estimation of a minihydro plant based on time series forecasting. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 34, n. 5, p. 1204-1209, maio 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2008.10.011>.

PEREZ-DIAZ, Juan I.; FRAILE-ARDANUY, Jesus. **Neural networks for optimal operation of a run-of-river adjustable speed hydro power plant with axial-flow propeller turbine**. 2008 16Th Mediterranean Conference On Control And Automation, [S.L.], p. 309-314, jun. 2008. IEEE.
<http://dx.doi.org/10.1109/med.2008.4602228>.

PETERS, Rebecca; BERLEKAMP, Jürgen; LUCÍA, Ana; STEFANI, Vittoria; TOCKNER, Klement; ZARFL, Christiane. **Integrated Impact Assessment for Sustainable Hydropower Planning in the Vjosa Catchment (Greece, Albania)**. **Sustainability**, [S.L.], v. 13, n. 3, 1514, 1 fev. 2021. MDPI AG.
<http://dx.doi.org/10.3390/su13031514>.

POR que escolher o IBM® SPSS® Statistics?. IBM®, 2021. Disponível em: <<https://www.ibm.com/br-pt/products/spss-statistics>>. Acesso em: 29 de nov. de 2021

QUARANTA, Emanuele; BONJEAN, Manuel; CUVATO, Damiano; NICOLET, Christophe; DREYER, Matthieu; GASPOZ, Anthony; REY-MERMET, Samuel; BOULICAUT, Bruno; PRATALATA, Luigi; PINELLI, Marco. **Hydropower Case Study Collection: innovative low head and ecologically improved turbines, hydropower in existing infrastructures, hydropeaking reduction, digitalization**

and governing systems. Sustainability, [S.L.], v. 12, n. 21, 8873, 26 out. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su12218873>.

ROSA-CLOT, Marco; TINA, Giuseppe Marco. Integration of PV Floating With Hydroelectric Power Plants (HPPs). **Floating Pv Plants**, [S.L.], p. 89-100, 2020. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-817061-8.00008-7>.

ROSSI, Mosè; RIGHETTI, Maurizio; RENZI, Massimiliano. Pump-as-turbine for Energy Recovery Applications: the case study of an aqueduct. **Energy Procedia**, [S.L.], v. 101, p. 1207-1214, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.163>.

SANTOLIN, A.; CAVAZZINI, G.; PAVESI, G.; ARDIZZON, G.; ROSSETTI, A.. Techno-economical method for the capacity sizing of a small hydropower plant. **Energy Conversion And Management**, [S.L.], v. 52, n. 7, p. 2533-2541, jul. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2011.01.001>.

SARI, Mutiara Ayu; BADRUZZAMAN, Mohammad; CHERCHI, Carla; SWINDLE, Matthew; AJAMI, Newsha; JACANGELO, Joseph G.. Recent innovations and trends in in-conduit hydropower technologies and their applications in water distribution systems. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 228, p. 416-428, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.078>.

SHEN, Jianjian; HU, Lin; CHENG, Chuntian; WANG, Sen. Automatic generation control of a large hydropower plant with head-sensitive forbidden and restricted zones. **Iet Renewable Power Generation**, [S.L.], v. 14, n. 7, p. 1113-1123, 26 fev. 2020. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/iet-rpg.2019.1055>.

SHEN, Jianjian; ZHANG, Xiufei; WANG, Jian; CAO, Rui; WANG, Sen; ZHANG, Jun. Optimal Operation of Interprovincial Hydropower System Including Xiluodu and Local Plants in Multiple Recipient Regions. **Energies**, [S.L.], v. 12, n. 1, 144, 2 jan. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en12010144>.

SPYDER. **Spyder**: The Scientific Python Development Environment, c2021. Home. Disponível em: <<https://www.spyder-ide.org/>>. Acesso em: 29 de nov de 2021.

STEFENON, Stéfano Frizzo; RIBEIRO, Matheus Henrique dal Molin; NIED, Ademir; YOW, Kin-Choong; MARIANI, Viviana Cocco; COELHO, Leandro dos Santos; SEMAN, Laio Oriel. Time series forecasting using ensemble learning methods for emergency prevention in hydroelectric power plants with dam. **Electric Power Systems Research**, [S.L.], v. 202, 107584, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107584>.

STITT, S.C.; MATUSZCZAK, L.A.. A Generation control system for Hoover powerplant to optimize. **Ieee Power Engineering Review**, [S.L.], v. 11, n. 2, p. 50, fev. 1991. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/mper.1991.88724>.

SUN, Yang; YAO, Yuting; YAN, Min; LIU, Jiaming; LI, Haimiao; BAO, Yan; LU, Mingwei. Energy conversion efficiency from low-head water to high-pressure gas. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 138, p. 1-10, ago. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.062>.

TADJIEV, U. A.; KISELEVA, E. I.; ZAKHIDOV, R. A.. Experience and Possibilities of Effective Use of Energy Resources Dargom-Taligulyanskiy Water and Energy Tract. Part I. **Applied Solar Energy**, [S.L.], v. 55, n. 3, p. 213-218, maio 2019. Allerton Press. <http://dx.doi.org/10.3103/s0003701x19030095>

TADJIEV, U. A.; KISELEVA, E. I.; ZAKHIDOV, R. A.. Experience and Possibilities of Effectively Utilizing the Energy Resources of the Dargom–Taligulyan Water and Energy Tract: part ii. **Applied Solar Energy**, [S.L.], v. 55, n. 6, p. 421-428, nov. 2019. Allerton Press. <http://dx.doi.org/10.3103/s0003701x19060112>.

TADZHIEV, U. A.; KISELEVA, E. I.; TADZHIEV, M. U.; ZAKHIDOV, R. A.. Improving energy efficiency of hydroelectric power stations at irrigation reservoirs by wind power add-in. **Applied Solar Energy**, [S.L.], v. 48, n. 2, p. 146-151, abr. 2012. Allerton Press. <http://dx.doi.org/10.3103/s0003701x12020211>.

TRIVEDI, Chirag; AGNALT, Einar; DAHLHAUG, Ole Gunnar. Investigations of unsteady pressure loading in a Francis turbine during variable-speed operation. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 113, p. 397-410, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.005>.

VAGNONI, E.; ANDOLFATTO, L.; RICHARD, S.; MÜNCH-ALLIGNÉ, C.; AVELLAN, F.. Hydraulic performance evaluation of a micro-turbine with counter rotating runners by experimental investigation and numerical simulation. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 126, p. 943-953, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.015>.

VOROS, N.G.; KIRANOUDIS, C.T.; MAROULIS, Z.B.. Short-cut design of small hydroelectric plants. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 19, n. 4, p. 545-563, abr. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0960-1481\(99\)00083-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0960-1481(99)00083-x).

WERNER, T.G.; VERSTEGE, J.F.. An evolution strategy for short-term operation planning of hydrothermal power systems. **Ieee Transactions On Power Systems**, [S.L.], v. 14, n. 4, p. 1362-1368, 1999. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/59.801897>.

YANG, Yuqi; ZHOU, Jianzhong; LIU, Guangbiao; MO, Li; WANG, Yongqiang; JIA, Benjun; HE, Feifei. Multi-plan formulation of hydropower generation considering uncertainty of wind power. **Applied Energy**, [S.L.], v. 260, p. 114-239, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114239>.

YANG, Zhe; YANG, Kan; SU, Lyuwen; HU, Hu. The Short-Term Economical Operation Problem for Hydropower Station Using Chaotic Normal Cloud Model Based Discrete Shuffled Frog Leaping Algorithm. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 34, n. 3, p. 905-927, fev. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-019-02435-0>.

ZHANG, Hao; CHEN, Diyi; GUO, Pengcheng; LUO, Xingqi; GEORGE, Aggidis. A novel surface-cluster approach towards transient modeling of hydro-turbine

governing systems in the start-up process. **Energy Conversion And Management**, [S.L.], v. 165, p. 861-868, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.097>.

ZHANG, Xinshuo; MA, Guangwen; HUANG, Weibin; CHEN, Shijun; ZHANG, Shuai. Short-Term Optimal Operation of a Wind-PV-Hydro Complementary Installation: yalong river, sichuan province, china. **Energies**, [S.L.], v. 11, n. 4, p. 868, 9 abr. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en11040868>.

APÊNDICE A - Programação em Python para Coleta de Dados

```

#importação de bibliotecas utilizadas
import pytesseract as ocr
import numpy as np
import cv2
from PIL import Image, ImageChops
import time
import openpyxl

#inicia cronômetro para determinar tempo total de execução
start_time = time.time()

#acessar o caminho local do path tesseract
ocr.pytesseract.tesseract_cmd =
r'D:\Usuários\notebook_william_lenovo\OneDrive\Programação\zz_PATH e
Arquivos\Tesseract-OCR\tesseract.exe'

#função para cortar a área da foto de coleta da imagem
def coletar_area(img, area):

    #usando pillow (PIL)
    crop_img = img.crop(area)
    crop_img = ImageChops.invert(crop_img)

    return crop_img

#função para tratar imagem cortada antes de usar o tesseract para converter
imagem em texto
def tratamento_imagem(img, sc=1.2):

    #convertendo imagem em um array editável de numpy[x, y, CANALS]
    npimagem = np.asarray(img).astype(np.uint8)

    #redimensionando (zoom) foto através do sc definido
    img_zoom = cv2.resize(npimagem, None, fx=sc, fy=sc,
interpolation=cv2.INTER_CUBIC)

    #desfoque gaussiano em imagem
    img_zoom = cv2.GaussianBlur(img_zoom, (5, 5), 0)

    # diminuição dos ruídos antes da binarização da imagem
    img_zoom[:, :, 0] = 0 # zerando o canal R (RED)
    img_zoom[:, :, 2] = 0 # zerando o canal B (BLUE)

    # atribuição em escala de cinza na imagem
    im = cv2.cvtColor(img_zoom, cv2.COLOR_RGB2GRAY)

    # aplicação da truncagem binária para a intensidade
    # pixels de intensidade de cor abaixo de 127 serão convertidos para 0
(PRETO)
    # pixels de intensidade de cor acima de 127 serão convertidos para 255
(BRANCO)
    # A atribuição do THRESH_OTSU incrementa uma análise inteligente dos
níveis de truncagem
    ret, thresh = cv2.threshold(im, 127, 255, cv2.THRESH_BINARY |
cv2.THRESH_OTSU)

```

```

    # reconvertendo com o retorno do threshold em um objeto do tipo
    PIL.Image
    binimagem = Image.fromarray(thresh)

    #retorna a imagem tratada
    return binimagem
'''
def inverter_cor (img):
    inv_img = ImageChops.invert(img)

    return inv_img
'''
#posição em pixel de cada coleta de dados, definido em tupla

#Geral
data = (1798, 8, 1914, 28)
hora = (1807, 29, 1907, 51)
nivel_canal = (70, 556, 121, 577)
temperatura = (1818, 58, 1904, 87)

#para UG1_fixo
UG1_FaseR_tensao = (10, 146, 95, 163)
UG1_FaseR_corrente = (108, 146, 192, 163)
i = 20 #um campo é 17 pixel abaixo do outro
UG1_potencia_ativa = (10, 146+i, 95, 163+i)
UG1_potencia_reativa = (108, 146+i, 192, 163+i)
UG1_fator_potencia = (10, 146+i*2, 95, 163+i*2)
UG1_distribuidor = (108, 146+i*2, 192, 163+i*2)
UG1_campo_excitacao_tensao = (10, 146+i*3, 95, 163+i*3)
UG1_campo_excitacao_corrente = (108, 146+i*3, 192, 163+i*3)

fixo = 139 #valor em y
#para UG2_fixo
UG2_FaseR_tensao = (10, 146+fixo, 95, 163+fixo)
UG2_FaseR_corrente = (108, 146+fixo, 192, 163+fixo)
i = 20 #um campo é 17 pixel abaixo do outro
UG2_potencia_ativa = (10, 146+i+fixo, 95, 163+i+fixo)
UG2_potencia_reativa = (108, 146+i+fixo, 192, 163+i+fixo)
UG2_fator_potencia = (10, 146+i*2+fixo, 95, 163+i*2+fixo)
UG2_distribuidor = (108, 146+i*2+fixo, 192, 163+i*2+fixo)
UG2_campo_excitacao_tensao = (10, 146+i*3+fixo, 95, 163+i*3+fixo)
UG2_campo_excitacao_corrente = (108, 146+i*3+fixo, 192, 163+i*3+fixo)

#UG1_variavel
UG1_acumulado_energia = (787, 474, 1003, 506)
UG1_velocidade = (851, 423, 956, 445)
UG1_potencia_ativa_oper = (490, 499, 560, 524)
UG1_potencia_aparente = (846, 337, 953, 361)

#anterior = 865
variavel = 875
#UG2_variavel
UG2_acumulado_energia = (787+variavel, 474, 1003+variavel, 506)
UG2_velocidade = (851+variavel, 423, 956+variavel, 445)
UG2_potencia_ativa_oper = (490+variavel, 499, 560+variavel, 524)
UG2_potencia_aparente = (846+variavel, 337, 953+variavel, 361)

```

```

#lista de variveis para coleta
geral = [data, hora, nivel_canal, temperatura]

#-----xxx-----
UG1_fixo = [UG1_FaseR_tensao, UG1_FaseR_corrente, UG1_potencia_ativa,
UG1_potencia_reativa,
            UG1_fator_potencia, UG1_distribuidor,
UG1_campo_excitacao_tensao, UG1_campo_excitacao_corrente]
UG1_variavel = [UG1_acumulado_energia, UG1_velocidade,
UG1_potencia_ativa_oper, UG1_potencia_aparente]

#-----xxx-----
UG2_fixo = [UG2_FaseR_tensao, UG2_FaseR_corrente, UG2_potencia_ativa,
UG2_potencia_reativa,
            UG2_fator_potencia, UG2_distribuidor,
UG2_campo_excitacao_tensao, UG2_campo_excitacao_corrente]
UG2_variavel = [UG2_acumulado_energia, UG2_velocidade,
UG2_potencia_ativa_oper, UG2_potencia_aparente]

#Coleta de dados para string por OCR e armazenar em planilha

#abrindo e ativando o a planilha de excel modelo
wb = openpyxl.load_workbook("model_bd_coleta.xlsx")
planilha = wb.active

print("Iniciando a leitura das imagens...")

#coletando para 2022-02 - lote - 1
#coletando para 2022-02 - lote - 2.1
#coletando para 2022-02 - lote - 2.2
#coletando para 2022-02 - lote - 3

#>>>> coletando para 2022-01 - lote - 1 - 1 a 1700
#coletando para 2022-01 - lote - 1 - 1701 a 4638, erro em 2107

#l é o valor de linhas
for l in range(1700, 4638):

    try:
        #iniciando o cronometro para cada imagem
        tempo_foto = time.time()

        # tipando a leitura para os canais de ordem RGB
        local_img = f"img_coleta/2022-03/01/img_{l}.jpeg"
        l=l+1
        imagem = Image.open(local_img).convert("RGB")

        #inicio da Coluna e retornando ao inicio
        c=0

        #planilha.cell(row=l, column=c).value = "teste"

        #Geral
        #Coleta da Geral
        k = 0

```

```

for k in range(len(geral)):

    area = geral[k]

    img_tratada = coletar_area(imagem, area)
    #img_tratada.show()

    img_tratada = tratamento_imagem(img_tratada, 4)
    #img_tratada.show()

    texto = ocr.image_to_string(img_tratada)#, timeout=4)

    c = c+1
    planilha.cell(row=1, column=c).value = texto[:-1]
    #print(texto[:-1])

    k+=k

#Coleta da UG1_fixo
k = 0
for k in range(len(UG1_fixo)):

    area = UG1_fixo[k]

    img_tratada = coletar_area(imagem, area)
    #img_tratada.show()

    img_tratada = tratamento_imagem(img_tratada, 20)
    #img_tratada.show()

    texto = ocr.image_to_string(img_tratada)#, timeout=2)

    c = c+1
    planilha.cell(row=1, column=c).value = texto[:-1]
    #print(texto[:-1])

    k+=k
#Coleta da UG1_variavel
k = 0
for k in range(len(UG1_variavel)):

    area = UG1_variavel[k]

    img_tratada = coletar_area(imagem, area)
    #img_tratada.show()

    img_tratada = tratamento_imagem(img_tratada, 6)
    #img_tratada.show()

    texto = ocr.image_to_string(img_tratada)#, timeout=4)

    c = c+1
    planilha.cell(row=1, column=c).value = texto[:-1]
    #print(texto[:-1])

    k+=k

```

```

#Coleta da UG2_fixo
k = 0
for k in range(len(UG2_fixo)):
    area = UG2_fixo[k]

    img_tratada = coletar_area(imagem, area)
    #img_tratada.show()

    img_tratada = tratamento_imagem(img_tratada, 20)
    #img_tratada.show()

    texto = ocr.image_to_string(img_tratada)#, timeout=2)

    c = c+1
    planilha.cell(row=1, column=c).value = texto[:-1]
    #print(texto[:-1])

    k+=k

#Coleta da UG2_variavel
k = 0
for k in range(len(UG2_variavel)):

    area = UG2_variavel[k]

    img_tratada = coletar_area(imagem, area)
    #img_tratada.show()

    img_tratada = tratamento_imagem(img_tratada, 6)
    #img_tratada.show()

    texto = ocr.image_to_string(img_tratada)#, timeout=4)

    c = c+1
    planilha.cell(row=1, column=c).value = texto[:-1]
    #print(texto[:-1])

    k+=k

#entrar no loop - salvar por foto
wb.save("coleta_2022_03-lote_1.2.xlsx")

print(f"Salvo Foto [{l-1}] | --- Tempo Foto: %.6s segundos ---"
      %(time.time() - tempo_foto))

except:
    print(f"Error foto: img [{l-1}]")
    pass

#fechando a planilha de excel
wb.close()

#apresentando o Print para cada imagem coletado com o tempo para
acompanhamento do tempo
print("--- Tempo Total: %.6s segundos ---" % (time.time() - start_time))

```